

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

E.A.P. DE FÍSICA

**Desarrollo de software para cálculo neutrónico en el
reactor RP-10**

TESIS

para optar el Título Profesional de Licenciado en Física

AUTOR

Richard Medina Calderón

ASESOR

Máximo Poma

Ricardo Cuya Guizado

Lima – Perú

2004

A mis Padres:

Bartolo y Dolores

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiese sido posible sin el valioso apoyo de las siguientes personas e instituciones a las que deseo nombrar y agradecer sinceramente:

A todo el departamento de Cálculo y Análisis y Seguridad del IPEN por sus útiles consejos y por el interés puesto en este trabajo.

A la Universidad Nacional Mayor de San Marcos y a su excelente personal académico por la formación brindada.

Al Mg. Máximo Poma por la revisión teórica y el asesoramiento en general de este modesto trabajo y por incentivar me en la continuación del mismo.

Al Lic. Ricardo Cuya Guizado, mi co-asesor sin el cual este trabajo no hubiese alcanzado su meta y los resultados no hubiesen sido los esperados.

Al Ing. Manuel Nieto, jefe del departamento de cálculo, análisis y seguridad por brindarme las facilidades de las instalaciones y el equipo necesario para elaborar mi proyecto.

Al Dr. Agustín Zúñiga por alcanzarme el reporte experimental del núcleo de arranque N14, sin el cual este trabajo no hubiese sido validado.

Al Ing. Rubén Caballero Andaluz, por haber dispuesto su valioso tiempo para discutir temas relacionados a la parte de programación y por sus acertadas recomendaciones.

.

RESUMEN

Se presenta el desarrollo del Software WIMCIT; el cual ha sido producido tomando como base el CPC[16] (Código para Cálculo de Reactores), que realiza la simulación, automatiza las entradas numéricas y genera el modelamiento matemático en formato estándar, para el código de cálculo neutrónico CITATION [11] del reactor nuclear peruano RP-10 en 2 y 3 dimensiones para varios grupos de energía. Dicho código se encarga de hallar la solución numérica de la ecuación de transporte en su aproximación de difusión, mediante el método de diferencias finitas y muestra sus salidas para un análisis posterior con el Software WIMCIT. Finalmente se han añadido al programa desarrollado; capacidades gráficas y comunicación con el sistema operativo, los cuales permitirán un manejo robusto del proceso, una fácil interacción usuario-software, y mejoras sustanciales en la visualización de los resultados.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS	1
1.2 METODOLOGÍA DE TRABAJO	2
1.2.1. ARCHIVOS DE ENTRADA PARA EL CODIGO CITATION	2
1.2.2. ARCHIVOS DE SALIDA DEL CITATION	2
 2. ASPECTOS GENERALES DE LA TEORÍA DE TRANSPORTE Y DE LA APROXIMACIÓN DE DIFUSIÓN NEUTRÓNICA	 5
2.1 ECUACIÓN DE TRANSPORTE NEUTRÓNICO	5
2. 2 LA APROXIMACIÓN DE DIFUSIÓN	7
2.2. 1 LA ECUACIÓN DE CONTINUIDAD NEUTRÓNICA	8
2.2.2 SIMPLIFICACIONES COMUNES A LA ECUACIÓN DE TRANSPORTE	8
2. 2. 3 LA ECUACIÓN DE DIFUSIÓN A UNA VELOCIDAD	10
2. 2. 4 CONDICIONES INICIALES Y DE FRONTERA EN LA TEORÍA DE DIFUSIÓN	10
2. 2. 5 MÉTODOS NUMÉRICOS PARA RESOLVER LA ECUACIÓN DE DIFUSIÓN	11
2. 2. 6 ECUACIÓN DE DIFUSIÓN A UNA VELOCIDAD EN UN REACTOR “SLAB”	13
2. 2. 7 CONDICIONES DE CRITICIDAD Y FACTORES DE MULTIPLICACIÓN	15
2. 2. 8 CÁLCULO DEL FACTOR PICO	15
 3. CÓDIGO PARA CÁLCULO NEUTRÓNICO: CITATION	 16
3.1 REQUERIMIENTOS PARA LA ENTRADA DE DATOS:	16
 4. DESCRIPCIÓN DEL REACTOR RP-10	 28
4.1 CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES DEL DISEÑO	30
4.2 ESTRUCTURA DEL REACTOR	31
4.3 COMPONENTES DEL NÚCLEO	31

4.4 ELEMENTOS COMBUSTIBLES	32
4.5 CÁLCULO DEL REACTOR	33
5. DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA WIMCIT	34
5.1 REQUERIMIENTOS DE SOFTWARE	34
5.2 DETALLE DEL DESARROLLO DEL WIMCIT	36
5.3 DOCUMENTACIÓN DEL WIMCIT	37
6. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS CALCULADOS CON LOS REPORTES EXPERIMENTALES DEL NÚCLEO DE ARRANQUE DEL REACTOR NUCLEAR RP-10 A POTENCIA = 88.58 W¹	38
6.1 TABLAS	40
6.2 GRÁFICAS	41
7. CONCLUSIONES	44
8. ALCANCES ADICIONALES DEL SOFTWARE	45
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
APÉNDICE A	
BIBLIOTECA DE SECCIONES EFICACES A 2 GRUPOS DE ENERGÍA PARA LOS ELEMENTOS DEL NÚCLEO DEL REACTOR RP-10	47
APENDICE B	
SECCIÓN 003 Y 004	56
APENDICE C	
INTERPOLACIÓN DE NEWTON DE 2° ORDEN	57
APENDICE D	
MAPA DE FLUJOS A 2 GRUPOS ENERGÉTICOS DEL NÚCLEO N14	62

¹ Para este caso no se encontró reportes de potencia y quemado generados.

APENDICE E

DATOS DE ENTRADA PARA EL CASO N14 A DOS DIMENSIONES	65
---	----

APENDICE F

MODELO MATEMÁTICO EN 3 DIMENSIONES DEL RP-10	70
--	----

1. INTRODUCCIÓN

Un reactor nuclear es un dispositivo en el cual la población neutrónica producida por fisión nuclear es controlada.

Los neutrones en el reactor realizan un movimiento aleatorio, debido a múltiples colisiones con los núcleos. Como consecuencia de este movimiento los neutrones se difunden en el medio variando su posición, dirección y energía. Se dice que en este caso que los neutrones han sido transportados desde una región de energía elevada a otra de menor energía, y es por eso que al estudio de este fenómeno es conocido como *teoría de transporte*.

El movimiento de los neutrones se describe por la *Ecuación de Boltzmann* o ecuación de transporte. Desafortunadamente; esta es una ecuación de difícil solución, sin embargo bajo ciertas condiciones esta ecuación conduce a una versión o aproximación simplificada llamada Aproximación o teoría de Difusión [2] que se utiliza frecuentemente en el cálculo neutrónico.

El código de cálculo para reactores CITATION [11] es un programa creado en lenguaje Fortran que utiliza la teoría de Difusión para resolver la ecuación de transporte.

El software WIMCIT que preparamos, viene a ser una Interfase gráfica que facilita la presentación de los parámetros de entrada al código de cálculo para reactores CITATION y procesa la salida del mismo código para finalmente darnos una presentación ordenada de Flujos, Potencias y Quemado del núcleo del reactor RP-10.

1.1 OBJETIVOS

- ❑ Desarrollar un programa en Lenguaje Delphi [21] que organice la data de entrada para el reactor RP-10, automatice el modelamiento matemático correspondientes a un Reactor tipo Slab, interaccione el cálculo neutrónico con el código CITATION [11] y analice los resultados obtenidos con dicho código.
- ❑ Aplicar el programa al núcleo de arranque del reactor nuclear RP-10 y comprobar los resultados con los reportes de operación experimentales [17].

1.2 METODOLOGÍA DE TRABAJO

1.2.1. ARCHIVOS DE ENTRADA PARA EL CÓDIGO CITATION

- **Archivo N14.cnf.** Archivo que almacena la configuración nuclear, librerías asociadas, potencia de operación, Irradiación ($MW \cdot D / TnU$), días de operación, posiciones de las barras de control y la fecha de operación del núcleo.
- **Archivo WimCitNG.lib.** Archivo que almacena las secciones eficaces a diferentes grupos de energía, quemado y potencia de los elementos del núcleo del reactor. Este archivo se obtiene a partir de la salida del código de cálculo de celdas llamado WIMS [2] y ha sido generado para cada uno de los modelos usados en nuestro cálculo.
- **Archivo Q14_0000.lib.** Archivo que almacena el quemado de los elementos combustibles ($MW \cdot D / TnU$) a la última fecha de operación. Se encuentra especificado dentro del archivo de configuración Nuclear N14.cnf.
- **Archivo Fort.31.** Archivo generado por el programa WIMCIT que especifica los valores de las diferentes secciones eficaces para los elementos del núcleo en diferentes grupos energéticos a valores de potencia y quemado (Sección 008 del CITATION [3]).
- **Archivo N14.dat.** Archivo generado por el programa WIMCIT que describe la geometría del reactor en el formato del código CITATION [3]. En el caso 2D consideramos al núcleo como un plano, mientras que en el caso 3D representamos al núcleo en su forma real y dividimos su altura en 21 planos distanciados cada uno de la grilla de soporte una distancia especificada por la sección 004 del código de cálculo CITATION[3].

1.2.2. ARCHIVOS DE SALIDA DEL CITATION

- **Archivo N14.out.** Archivo generado por el código CITATION [3] y que es el resultado del cálculo de flujos utilizando la aproximación de difusión.
- **Archivo N14.map.** Archivo procesado tomando como base el archivo N14.out y que nos representa los valores de la potencia y de los flujos a

varios grupos de energía para cada una de las celdas del núcleo

- **Archivo N14.lis.** Archivo procesado tomando como base el archivo N14.out y que nos representa los valores de quemado para cada elemento combustible normal y de control.
- **Archivo N14.pks.** Archivo que contiene el cálculo de la razón ($P_{\text{máx en la placa}} / P_{\text{media en el núcleo}}$) denominada factor pico para los casos 2D y 3D. Este archivo es también resultado del procesamiento del archivo N14.out.
- **Archivo Burn3D_N14.lis.** Archivo procesado al ejecutar un caso en 3D el cual nos muestra el quemado de los elementos combustibles en 21 planos. Este archivo toma como base el archivo N14.out en 3D.
- **Archivo Flujos3D_N14.map.** Archivo procesado al ejecutar un caso en 3D el cual nos muestra el flujo por celda y por cada uno de los 21 planos (y por grupo energético) de los elementos constituyentes del núcleo del reactor. Este archivo toma también como base el archivo N14.out en 3D.
- **Archivo Power3D_N14.map.** Archivo que nos muestra la potencia por celda en cada uno de los 21 planos en que se ha dividido el núcleo del reactor. Este archivo al igual que los dos archivos anteriores toma también como base el archivo de salida N14.out en 3D.

GRÁFICA DE FLUJOS, QUEMADO Y POTENCIAS.

Para los casos ejecutados en 2D, los flujos y las potencias son graficados para ver la variación del flujo con respecto a las celdas que constituyen el núcleo a lo largo de una fila o columna.

En el caso 3D, se muestra un mapa superficial de todo el núcleo y además se realiza una representación del flujo por cada celda en los 21 planos para cada grupo de energía. De esta manera vemos el comportamiento axial de una celda a través de cada plano.

Para las gráficas de potencia por celda en el caso 3D, representamos los valores de la potencia generada por las celdas combustibles a lo largo de los 21 planos en que se ha dividido la altura del núcleo.

Las gráficas de quemado representan el porcentaje de quemado de combustible en cada celda y las gráficas de potencia representan las potencias generadas por celda. Ambas gráficas son representadas en forma de barras.

A continuación, en la figura 1 se representa el diagrama de flujo resumido del WIMCIT:

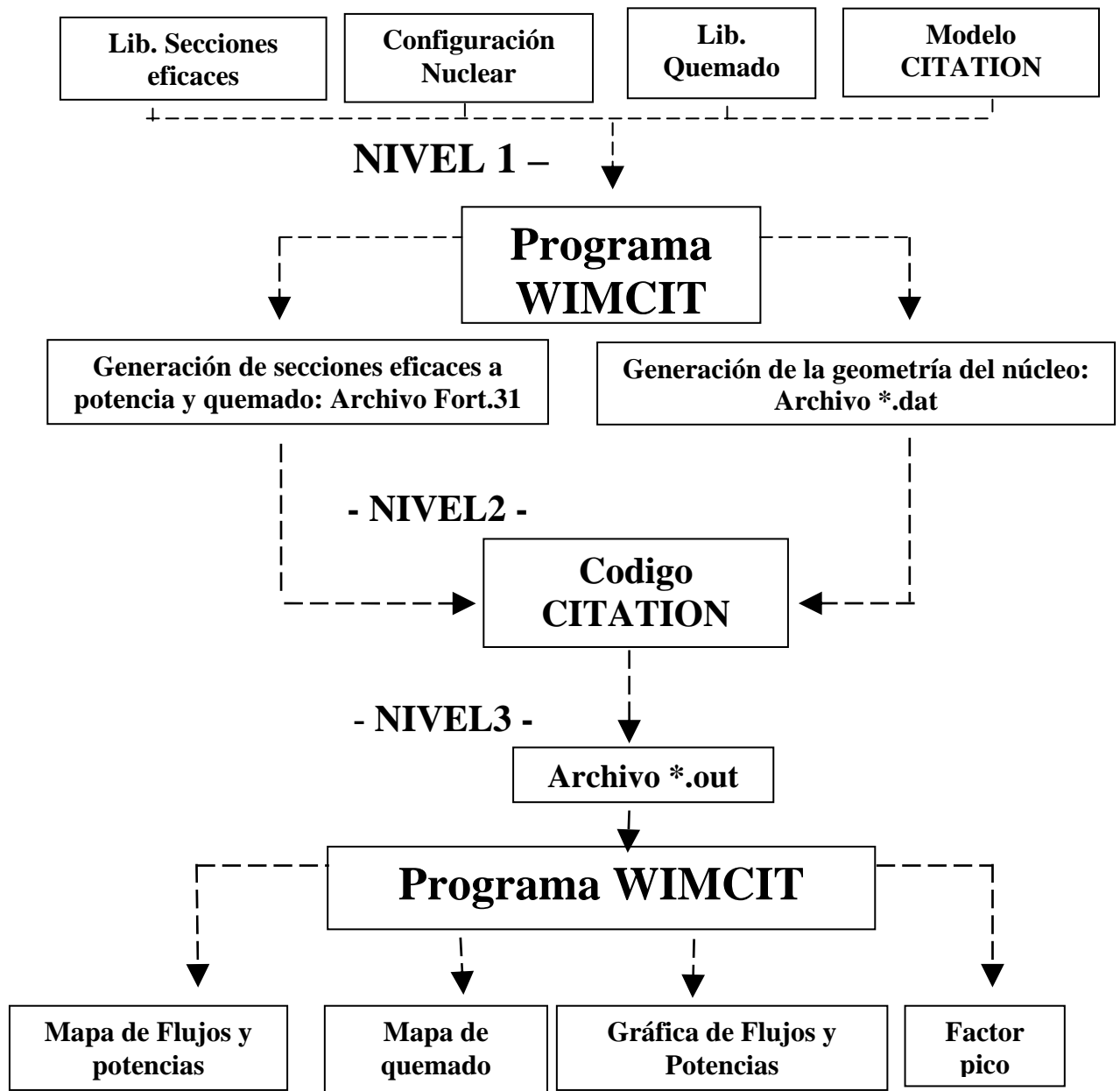


Fig. N° 1. Flujo simplificado de los cálculos del WIMCIT

2. ASPECTOS GENERALES DE LA TEORÍA DE TRANSPORTE Y DE LA APROXIMACIÓN DE DIFUSIÓN NEUTRÓNICA [12]

2.1 ECUACIÓN DE TRANSPORTE NEUTRÓNICO

Considerando un pequeño volumen arbitrario V en un punto del sistema, asumimos que el número de neutrones en V con energías comprendidas entre E y $E+dE$ atravesando en una dirección comprendida entre $\hat{\Omega}$ y $\hat{\Omega} + d\hat{\Omega}$ dentro de este volumen es:

$$\left[\int_V n(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t) d^3r \right] dE d\hat{\Omega} .$$

Donde n representa la densidad neutrónica.

La variación de esta cantidad es dada por la siguiente ecuación de balance:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\int_V n(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t) d^3r \right] dE d\hat{\Omega} = \text{Ganancia en } V - \text{Pérdidas desde } V \quad (1)$$

Si V no depende del tiempo llevamos la diferenciación del tiempo dentro de la integración espacial:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\int_V n(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t) d^3r \right] dE d\hat{\Omega} = \left[\int_V \frac{\partial n}{\partial t} d^3r \right] dE d\hat{\Omega} \quad (2)$$

La población de neutrones dentro de un volumen puede variar por los siguientes mecanismos:

Mecanismos de ganancia:

[A] Fuente de neutrones en V (por ejemplo fisiones).

[B] Corriente de neutrones dentro de V a través de la superficie S .

[C] Neutrones de diferente E , y $\hat{\Omega}$ que sufren una dispersión en V que cambia a E , y a $\hat{\Omega}$.

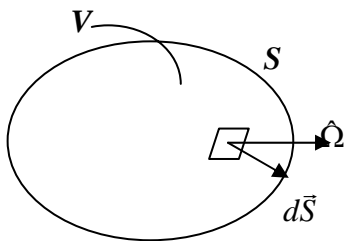


Fig. N° 2. Un volumen arbitrario V con área superficial S

Mecanismos de pérdidas:

[D] Neutrones que escapan a través de la superficie S .

[E] Neutrones en V que sufren una colisión.

Ahora escribimos una expresión matemática para cada una de estas contribuciones:

[A] TÉRMINO DE FUENTES. Si definimos:

$$s(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t) d^3r dE d\hat{\Omega} \equiv \text{Tasa de fuente de neutrones que aparecen en el volumen } d^3r \text{ en la posición } \vec{r}, \text{ con energías comprendidas entre } E \text{ y } E + dE, \text{ y dirección entre } \hat{\Omega} \text{ y } \hat{\Omega} + d\hat{\Omega} \quad (3)$$

entonces la integración sobre todo el volumen resulta:

$$[A] = \left[\int_V s(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t) d^3r \right] dE d\hat{\Omega} \quad (4)$$

[E] PÉRDIDA POR COLISIONES EN V . La tasa a la cual los neutrones sufren colisiones en el punto \vec{r} es:

$$f_t(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t) = \nu \sum_t (r, E) n(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t) \quad (5)$$

$$[E] = \left[\int_V \nu \sum_t (r, E) n(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t) d^3r \right] dE d\hat{\Omega} \quad (6)$$

Donde:

ν , representa la velocidad de los neutrones en consideración y

$\Sigma_t = \Sigma_a + \Sigma_s$, es la sección eficaz macroscópica total (sección eficaz de absorción más sección eficaz de dispersión)

[C] La ganancia debido a la dispersión de neutrones con energías comprendidas entre E y $E + dE$, y con direcciones entre $\hat{\Omega}$ y $\hat{\Omega} + d\hat{\Omega}$ desde otras energías E' y direcciones $\hat{\Omega}'$. La probabilidad de dispersión desde $E', \hat{\Omega}'$ hacia $E, \hat{\Omega}$ es:

$$\left[\int_V \nu' \sum_s (E' \rightarrow E, \hat{\Omega}' \rightarrow \hat{\Omega}) n(\vec{r}, E', \hat{\Omega}', t) d^3r \right] dE d\hat{\Omega} \quad (7)$$

Sin embargo debemos considerar contribuciones desde cualquier $E', \hat{\Omega}'$. Y así:

$$[C] = \left[\int_V d^3r \int_{4\pi} d\hat{\Omega}' \int_0^\infty dE' \nu' \sum_s (E' \rightarrow E, \hat{\Omega}' \rightarrow \hat{\Omega}) n(\vec{r}, E', \hat{\Omega}', t) \right] dE d\hat{\Omega} \quad (8)$$

Este término caracteriza la dispersión de neutrones desde otras energías o direcciones dentro de $dE d\hat{\Omega}$.

[B] y [D] FUGAS A TRAVÉS DEL VOLUMEN V . Combinando estos términos juntos se puede calcular el flujo neto a través de la superficie S y usando la definición de densidad de corriente angular $\vec{j}(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t)$, escribimos la tasa a la cual los neutrones de energías E , y direcciones $\hat{\Omega}$ salen de $d\vec{S}$ como:

$$\vec{j}(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t) d\vec{S} = v \hat{\Omega} n(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t) d\vec{S} \quad (9)$$

De este modo la contribución de fugas sobre toda la superficie \vec{S} es:

$$[D] - [B] = \int_S d\vec{S} v \hat{\Omega} n(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t) \quad (10)$$

Usando el teorema de Gauss:

$$\begin{aligned} \left[\int_S d\vec{S} v \hat{\Omega} n(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t) \right] dE d\hat{\Omega} &= \left[\int_V d^3r \nabla \cdot v \hat{\Omega} n(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t) \right] dE d\hat{\Omega} \\ &= \left[\int_V d^3r v \hat{\Omega} \nabla n(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t) \right] dE d\hat{\Omega} \end{aligned} \quad (11)$$

La tasa de cambio del número de neutrones en el volumen V vendrá dada por:

$$V = [A] + [B] + [C] - [D] - [E] \quad (12)$$

En forma explícita, de la condición (1) y (2):

$$\begin{aligned} \int_V d^3r \left[\frac{\partial n}{\partial t} + v \hat{\Omega} \nabla n + v \sum_t n(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t) - \right. \\ \left. \int_0^\infty dE' \int_{4\pi} d\hat{\Omega}' v' \sum_s (E' \rightarrow E, \hat{\Omega}' \rightarrow \hat{\Omega}) n(\vec{r}, E', \hat{\Omega}', t) - s(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t) \right] dE d\hat{\Omega} = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

Esta ecuación es válida para todo volumen, en consecuencia el integrando de los corchetes debe ser idénticamente nulo, De esta manera llegamos a la ecuación de balance:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} + v \hat{\Omega} \nabla n + v \sum_t n(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t) = \\ \int_{4\pi} d\hat{\Omega}' \int_0^\infty dE' v' \sum_s (E' \rightarrow E, \hat{\Omega}' \rightarrow \hat{\Omega}) n(\vec{r}, E', \hat{\Omega}', t) - s(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t) \end{aligned} \quad (15)$$

Si definimos el flujo angular $\phi(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t) \equiv v n(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t)$, esta ecuación tomaría la forma:

$$\begin{aligned} \frac{1}{v} \frac{\partial \phi}{\partial t} + \hat{\Omega} \cdot \nabla \phi + \sum_t (\vec{r}, E) \cdot \phi(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t) = \\ \int_{4\pi} d\hat{\Omega}' \int_0^\infty dE' \sum_s (E' \rightarrow E, \hat{\Omega}' \rightarrow \hat{\Omega}) \cdot \phi(\vec{r}, E', \hat{\Omega}', t) - s(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t) \end{aligned} \quad (16)$$

Nuevamente aquí Σ_t es la sección eficaz macroscópica total y Σ_s la sección eficaz de dispersión macroscópica total.

La ecuación (16) es conocida como la ecuación de transporte neutrónico.

2.2 LA APROXIMACIÓN DE DIFUSIÓN

2.2.1 LA ECUACIÓN DE CONTINUIDAD NEUTRONICA

En muchos cálculos de reactores los detalles de la dependencia angular del flujo neutrónico no son rigurosamente necesarios, y por consiguiente solo se requiere calcular el flujo integrado:

$$\phi(\vec{r}, E, t) = \int_{4\pi} d\hat{\Omega} \phi(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t);$$

Y así, después de algunas simplificaciones la ecuación (16) toma la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \frac{1}{v} \frac{\partial \phi}{\partial t} + \hat{\Omega} \bar{J}(\vec{r}, E, t) + \sum_t (\vec{r}, E) \phi(\vec{r}, E, t) = \\ \int_0^\infty dE' \sum_s (E' \rightarrow E) \phi(\vec{r}, E', t) + s(\vec{r}, E, t) \end{aligned} \quad (17)$$

Esta es conocida como la ecuación de continuidad neutrónica, donde \bar{J} es definida como la densidad de corriente neutrónica:

$$\bar{J}(\vec{r}, E, t) \equiv \int_{4\pi} d\hat{\Omega} \phi(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t) \quad (18)$$

2. 2. 2 SIMPLIFICACIONES MÁS COMUNES A LA ECUACIÓN DE TRANSPORTE

APROXIMACIÓN A UNA VELOCIDAD.- A fin de simplificar la ecuación de transporte; se introduce la hipótesis de que todos los neutrones tienen la misma rapidez o energía y que en las condiciones de dispersión no existe variación energética. Entonces en la ecuación (17) asumimos la sección eficaz de dispersión de esta manera:

$$\sum_s (E' \rightarrow E, \hat{\Omega}' \rightarrow \hat{\Omega}) = \sum_s (E, \hat{\Omega}' \rightarrow \hat{\Omega}) \delta(E' - E) \quad (19)$$

Y usando el primer término de la derecha de (16):

$$\int_{4\pi} d\hat{\Omega}' \sum_s (E, \hat{\Omega}' \rightarrow \hat{\Omega}) \varphi(\vec{r}, E, \hat{\Omega}', t) \quad (20)$$

Y como ahora todos los términos de la ecuación de transporte son evaluados para la misma energía, podemos eliminar esta dependencia energética para escribir la ecuación de transporte neutrónico a una velocidad:

$$\begin{aligned} \frac{1}{v} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \hat{\Omega} \nabla \varphi + \sum_t (\vec{r}) \varphi(\vec{r}, \hat{\Omega}, t) = \\ \int_{4\pi} d\hat{\Omega}' \sum_s (\hat{\Omega}' \rightarrow \hat{\Omega}) \varphi(\vec{r}, \hat{\Omega}', t) + s(\vec{r}, \hat{\Omega}, t) \end{aligned} \quad (21)$$

Sin embargo, para resolver esta ecuación es necesario introducir otras simplificaciones.

FUENTES ISOTRÓPICAS Y DISPERSIÓN.- En este caso asumimos fuentes de neutrones isotrópicas:

$$s(\vec{r}, \hat{\Omega}, t) = \frac{1}{4\pi} S(\vec{r}, t) \quad (22)$$

y dispersión isotrópica (En el sistema Laboratorio):

$$\sum_s (\hat{\Omega}' \rightarrow \hat{\Omega}) = \frac{1}{4\pi} \sum_s \quad (23)$$

De esta manera la ecuación de transporte a una velocidad se vería de esta forma:

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \hat{\Omega} \nabla \varphi + \sum_t \varphi(\vec{r}, \hat{\Omega}, t) = \frac{\Sigma_s}{4\pi} \int_{4\pi} d\hat{\Omega}' \varphi(\vec{r}, \hat{\Omega}', t) + \frac{s(\vec{r}, t)}{4\pi} \quad (24)$$

ESTADO ESTACIONARIO DE LA ECUACIÓN DE TRANSPORTE.- En condiciones estacionarias escribimos la ecuación de transporte de esta manera:

$$\hat{\Omega} \nabla \varphi + \sum_t \varphi(\vec{r}, \hat{\Omega}) = \frac{\Sigma_s}{4\pi} \int_{4\pi} d\hat{\Omega}' \varphi(\vec{r}, \hat{\Omega}') + \frac{S(\vec{r})}{4\pi} \quad (25)$$

TRANSPORTE EN UN MEDIO PURAMENTE ABSORBENTE.- Frecuentemente nos interesamos en zonas externas al problema donde la dispersión hacia el interior o retro - dispersión (debido a colisiones exteriores) puede ser ignorada. Esto ocurriría si en los exteriores hubiera un vacío (en realidad consideraríamos una región externa del reactor la cual podría estar llena de gas). O se podría aplicar en un medio altamente absorbente como un elemento combustible o barra de control. En estos casos la ecuación de transporte tomaría una de sus forma más simplificadas de la siguiente forma:

$$\hat{\Omega} \nabla \varphi(\vec{r}, E, \hat{\Omega}) + \sum_a (\vec{r}, E) \varphi(\vec{r}, E, \hat{\Omega}) = s(\vec{r}, E, \hat{\Omega}) \quad (26)$$

Donde Σ_a es la sección eficaz macroscópica de absorción.

Notemos que aquí se omite la dependencia temporal, dado que en muchos problemas de transporte, es raramente de importancia.

2. 2. 3 LA ECUACIÓN DE DIFUSIÓN A UNA VELOCIDAD

Con ayuda de la ecuación de continuidad y la Ley de Fick se llega a una relación simplificada de la ecuación de transporte:

$$\nabla \cdot D(\vec{r}) \nabla \Phi - \Sigma_a \Phi(\vec{r}, t) + s(\vec{r}, t) = \frac{\partial n}{\partial t} \quad (27)$$

Donde $D = [3\Sigma_{tr}(\vec{r})]^{-1} = [3(\Sigma_t - \bar{\mu}_0 \Sigma_s)]^{-1}$, es conocido como el coeficiente de difusión, el cual puede ser constante si el sistema contiene materiales homogéneos.

$\bar{\mu}_0 = \langle \hat{\Omega} \cdot \hat{\Omega}' \rangle$, es el coseno promedio de dispersión angular entre neutros y núcleos blanco

Por consiguiente, si D es constante:

$$D \nabla^2 \Phi - \Sigma_a \Phi(\vec{r}, t) + s(\vec{r}, t) = \frac{1}{v} \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (28)$$

Esta ecuación es llamada también ecuación de Helmholtz y es muy usada en teoría de reactores nucleares.

2. 2. 4 CONDICIONES INICIALES Y DE FRONTERA EN LA TEORÍA DE DIFUSIÓN

A. CONDICIONES INICIALES.- Se considera las condiciones iniciales de la siguiente forma:

$$\Phi(\vec{r}, 0) = \Phi_0(\vec{r}), \text{ para todo } \vec{r} \quad (29)$$

B. CONDICIONES DE FRONTERA

B.1 CONDICION DE VACÍO.- Se asume que el reactor esta rodeado por una región vacía, por lo cual no hay neutrones reflejados hacia el núcleo. Pero como esta aproximación es inexacta en la teoría de difusión, lo que se hace es requerir que la corriente parcial reingresante hacia el núcleo, es decir:

$$J_-(\vec{r}) = \frac{1}{4} \Phi(\vec{r}_s) + \frac{D(\vec{r}_s)}{2} \hat{e}_s \cdot \nabla \Phi(\vec{r}_s),$$

se anule a una distancia fuera de la frontera actual de la superficie del reactor dada por:

$$z_0 = 0.7104 \lambda_{tr} \quad (30)$$

Donde λ_{tr} representa el camino libre medio, \vec{r}_s es el radio vector dirigido desde el origen hacia la superficie S (sistema laboratorio) y \hat{e}_s es el vector unitario normal a la superficie.

B.2 INTERFACES.- Se considera la continuidad de la densidad de corriente neutrónica $\vec{J}(\vec{r}, t)$ y del flujo neutrónico $\Phi(\vec{r}, t)$, a través de la interfase entre dos regiones de

diferentes secciones eficaces y se explica con las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}\Phi_1(\vec{r}_s, t) &= \Phi_2(\vec{r}_s, t) \\ -D_1 \nabla \Phi_1(\vec{r}_s, t) &= -D_2 \nabla \Phi_2(\vec{r}_s, t)\end{aligned}\tag{31}$$

2. 2. 5 METODOS NUMÉRICOS PARA RESOLVER LA ECUACIÓN DE DIFUSIÓN

El procedimiento mas general de resolver la ecuación es aplicando el método de diferencias finitas para regiones las cuales han sido discretizadas espacial y energéticamente. Finalmente se resuelve el sistema de ecuaciones resultantes de estas regiones discretizadas.

Un sencillo ejemplo para la aplicación de este método lo tomamos de la ecuación de difusión:

$$-D \frac{d^2 \Phi}{dx^2} + \Sigma_a \Phi(x) = S(x)\tag{32}$$

Sujeta a las condiciones de frontera $\Phi(a) = \Phi(0) = 0$. (Geometría Slab). De esta manera discretizamos la variable espacial x escogiendo un conjunto de $N + 1$ puntos discretos igualmente espaciados una distancia $\Delta = \frac{a}{N}$ entre ellos, como se explica en la figura 3.

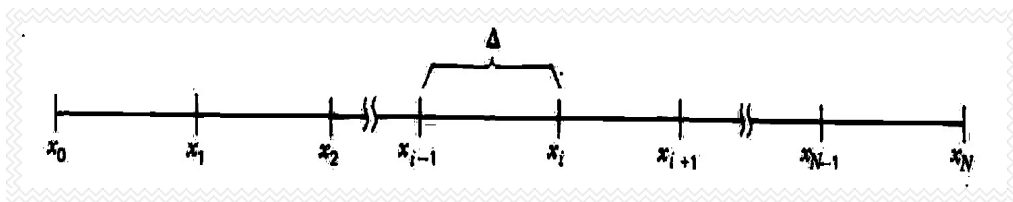


Fig. N° 3

A continuación aproximamos el término $\frac{d^2 \Phi}{dx^2}$, para lo cual debemos expandir Φ en series de Taylor en x_{i+1} alrededor de su valor en el punto x_i :

$$\Phi_{i+1} \equiv \Phi(x_{i+1}) = \Phi_i + \Delta \left. \frac{d\Phi}{dx} \right|_i + \frac{\Delta^2}{2} \left. \frac{d^2\Phi}{dx^2} \right|_i + \dots$$

$$\Phi_{i-1} \equiv \Phi(x_{i-1}) = \Phi_i - \Delta \left. \frac{d\Phi}{dx} \right|_i + \frac{\Delta^2}{2} \left. \frac{d^2\Phi}{dx^2} \right|_i - \dots$$

Los cuales sumando dan:

$$\left. \frac{d^2\Phi}{dx^2} \right|_i \approx \frac{\Phi_{i+1} - 2\Phi_i + \Phi_{i-1}}{\Delta^2} \quad (33)$$

Si $\Delta \ll 1$, esta fórmula de diferencia central de 3 puntos será una aproximación razonable de $\frac{d^2\Phi}{dx^2}$ en el punto x_i .

Entonces la ecuación (31) quedaría de la siguiente forma:

$$-D \left(\frac{\Phi_{i+1} - 2\Phi_i + \Phi_{i-1}}{\Delta^2} \right) + \Sigma_a \Phi_i = S_i, \quad i=1,2,\dots$$

O en forma de coeficientes:

$$a_{i,i-1} \Phi_{i-1} + a_{i,i} \Phi_i + a_{i,i+1} \Phi_{i+1} = S_i$$

Donde:

$$a_{i,i-1} = -\frac{D}{\Delta^2}, \quad a_{i,i} = \frac{2D}{\Delta^2} - \Sigma_a \quad \text{y} \quad a_{i,i+1} = -\frac{D}{\Delta^2}$$

$$i = 1, 2, \dots, N-1$$

Así la ecuación (32) queda reducida a un conjunto de $N-1$ ecuaciones algebraicas para $N+1$ flujos desconocidos $(\Phi_0, \Phi_1, \dots, \Phi_N)$.

Si aplicamos las condiciones de frontera, podremos resolver el sistema de ecuaciones algebraicas por métodos iterativos.

2. 2. 6 ECUACIÓN DE DIFUSIÓN A UNA VELOCIDAD EN UN REACTOR “SLAB”

EL TÉRMINO FUENTE DE FISIÓN.- Asumimos que la difusión, absorción y fisión entre los neutrones y los núcleos blanco ocurren a la misma energía, por consiguiente el término que representa a las fisiones puede ser derivado con ayuda del término $v\Sigma_f\Phi(\vec{r}, t)$, el cual es llamado la densidad de tasas de fisión. De esta manera la razón a

la cual los neutrones de fisión aparecen en el reactor (fuente de fisión) es:

$$S_f(\vec{r}, t) = \nu \Sigma_f \Phi(\vec{r}, t) \quad (34)$$

Aquí S_f representa el término fuente debido a fisiones, ν es el número de neutrones producidos por fisión y Σ_f es la sección eficaz macroscópica de fisión.

EL REACTOR “SLAB” DEPENDIENTE DEL TIEMPO.- Considerando el término fuente de fisión descrito anteriormente, tenemos la descripción matemática del flujo neutrónico en un reactor “Slab”:

$$\frac{1}{\nu} \frac{\partial \Phi}{\partial t} - D \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \Sigma_a \Phi(x, t) = \nu \Sigma_f \Phi(x, t) \quad (35)$$

Con condiciones iniciales:

$$\Phi(x, 0) = \Phi_0(x) = \Phi_0(-x) \quad (\text{Simetría})$$

y condiciones de frontera:

$$\Phi\left(\frac{\tilde{a}}{2}, t\right) = \Phi\left(-\frac{\tilde{a}}{2}, t\right) = 0, \quad \tilde{a} \text{ viene a ser la longitud extrapolada del reactor.}$$

De esta manera la solución general de la aproximación de difusión simplificada tiene la forma:

$$\Phi(x, t) = \sum_{n = \text{impar}} A_n \exp(-\lambda_n t) \cos \frac{n \pi x}{\tilde{a}} \quad (36)$$

Donde: $\lambda_n = \nu \Sigma_a + \nu D B_n^2 - \nu \nu \Sigma_f \equiv \lambda_n$, $n = 1, 3, 5, \dots$; son los autovalores¹ de tiempo, y: $B_n^2 = \left(\frac{n \pi}{\tilde{a}}\right)^2$, es la medida de la curvatura del flujo.

Es particular importancia el cuadrado del primer eigenvalor, B_1^2 que también es conocido como el “Buckling” del sistema y es representado sin el subíndice:

¹ Para una explicación de los métodos de solución ver referencias [8] y [9].

$$B_1^2 = \left(\frac{\pi}{a} \right)^2 \equiv B_g^2 \equiv \text{Buckling Geométrico} \quad (37)$$

Este término mide el decaimiento del flujo en el reactor. En un reactor “Slab” finito el buckling del flujo se incrementa al disminuir el tamaño del sistema. En el caso del reactor RP10 obtenemos un valor para el buckling:

$$\left(\frac{\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{b} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{c} \right)^2 = 0.001530 \text{ cm}^{-2} \quad (38)$$

A continuación veremos las diferentes formas de expresar el buckling geométrico para los diferentes tipos de reactor.

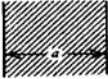


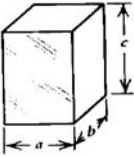
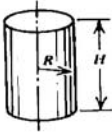
		Buckling Geométrico	Perfil de flujo
Slab		$\left(\frac{\pi}{a} \right)^2$	$\cos \frac{\pi x}{a}$
Infinite Cylinder		$\left(\frac{\nu_0}{R} \right)^2$	$J_0 \left(\frac{\nu_0 r}{R} \right)$
Sphere		$\left(\frac{\pi}{R} \right)^2$	$r^{-1} \sin \left(\frac{\pi r}{R} \right)$
Rectangular Parallelepiped		$\left(\frac{\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{b} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{c} \right)^2$	$\cos \left(\frac{\pi x}{a} \right) \cos \left(\frac{\pi y}{b} \right) \cos \left(\frac{\pi z}{c} \right)$
Finite Cylinder		$\left(\frac{\nu_0}{R} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{H} \right)^2$	$J_0 \left(\frac{\nu_0 r}{R} \right) \cos \left(\frac{\pi z}{H} \right)$

Fig. N° 4. Bucklings geométricos y perfiles de flujo de algunos núcleos

2. 2. 7 CONDICIONES DE CRITICIDAD Y FACTORES DE MULTIPLICACIÓN

El factor de multiplicación infinito (k_{∞}) se define como la relación que hay entre el número de neutrones que se producen por fisión en cada generación y el número de neutrones absorbidos en la generación anterior, correspondiente a un reactor de tamaño infinito.

La condición de criticidad (que hace posible la fisión en cadena controlada.) se reduce a $k_{\infty}=1$; en este caso los neutrones producidos en cada generación son iguales a los neutrones perdidos en la generación anterior. Así el reactor se mantiene en estado estacionario con densidad neutrónica constante. En un sistema finito, parte de los neutrones se pierden por escape; en este caso el factor de multiplicación efectivo (k_{eff}) se define como:

$$K_{\text{eff}} = \frac{\text{neutrones producidos por el reactor} / s}{\text{neutrones absorbidos} + \text{neutrones escapados} / s}$$

(39)

consiguiendo la siguiente relación:

$$\frac{k_{\text{eff}}}{k_{\infty}} = \frac{\text{neutrones absorbidos}}{\text{neutrones absorbidos} - \text{neutrones escapados}} = P \quad (40)$$

Donde P es una medida de la probabilidad de que los neutrones permanezcan en el sistema hasta que sean absorbidos.

2. 2. 8 CÁLCULO DEL FACTOR PICO

Dentro de las rutinas del software WIMCIT, utilizamos los valores del flujo generados por el código CITATION para calcular el factor pico, el cual está definido por la siguiente ecuación:

$$\text{Factor Pico} = K = \frac{P_{\text{max en la placa}}}{P_{\text{media en el núcleo}}} \quad (41)$$

Dicho cálculo es de utilidad para ver el estado de criticidad del reactor. Para un cálculo teórico de dicho factor podemos ver la referencia [22]:

3. CODIGO PARA CÁLCULO NEUTRONICO: CITATION [11]

3.1 REQUERIMIENTOS PARA LA ENTRADA DE DATOS:

La entrada de datos para el código CITATION [11], está dividida en secciones que especifican el tipo de cálculo a realizar. La primera tarjeta de cada sección contiene el número de la sección (tres dígitos enteros), que indican el tipo de entrada que se espera. El número de sección se indica en columnas del 1 al 3, dentro de la primera tarjeta correspondiente a cada sección. Dichas secciones deben estar en orden ascendente y una vez completada las entradas numéricas de todas las secciones que se van a utilizar se coloca una tarjeta con el número 999 para indicar que se ha finalizado un caso o cálculo. Cada caso debe comenzar con dos tarjetas de título y cada primer caso debe contener al menos las secciones 001, 003, 004, 005 y cualquiera de las tarjetas 008 o 012 o 020 para indicar las secciones eficaces.

A continuación detallamos las secciones y tarjetas usadas en el cálculo:

Sección 001: Control general

<u>Tarjeta 1:</u>	001
<u>Tarjeta 2:</u>	Control
NGC1 (1-3)	Liberación de memoria (> 0).
NGC2 (4-6)	Re- inicio
	0 - No re-inicio.
	-1 - Continúa un caso previo.
	>0 - Re-inicia un cálculo al final de este número de ciclo.
NGC3 (7-9)	Escribe datos en el disco para luego re – iniciar (>0).
NGC4 (10-12)	-
NGC5 (13-15)	Almacena las secciones eficaces macroscópicas:
	- 01 perfora en 7,
	+01 escribe en 31.
NGC6 (16-18)	Imprime el mapa de flujo de neutrones en el disco (>0.)

NGC7 (19-21)	Imprime el mapa de densidad de potencia en disco (>0).
NGC8 (22-24)	Imprime fuente de neutrones puntuales (espacio- energía si >0).
NGC9 (25-27)	-
NGC10 (28-30)	Problema de autovalores: -5 - Fuente fija. -2 - Búsqueda directa del buckling. -1 - 0 - Cálculo del factor de multiplicación efectivo. >0 - Identificación del problema definido por los datos de la sección 028.
NGC11 (31-33)	Búsqueda con la opción NGC10 (<0) y todas las opciones de búsqueda (<0) en la sección 002.
NGC12 (34-36)	Adjunto e indicador de perturbación. Siguiendo el problema de autovalores de flujos de este ciclo, los flujos adjuntos serán calculados. La sección de entrada 040 especifica los cálculos de perturbación que serán realizados. Debería ser 1 si el cálculo de perturbación es un problema estático.
NGC13 (37-39)	Entrada del flujo adjunto desde un archivo para cálculos de perturbación. NGC12 debe ser 0.
NGC14 (40-42)	-
NGC15 (43-45)	Finalización (Se aplica sólo para el cálculo de iteración de flujo) 0 - Finaliza el cálculo y continúa como si el conteo de iteración fuese excedido (ver tarjeta 3 y 4 más abajo). 1 - Si los límites son excedidos, termina el cálculo y continúa si el proceso es convergente. 2 - Si los límites son excedidos, termina el cálculo.
NGC16 (46-48)	-
NGC17 (49-51)	-
NGC18 (52-54)	Cálculo del residuo Si ≥ 0 , los valores del factor de multiplicación y la sección eficaz de absorción macroscópica relativa, son obtenidos luego de

	terminar el problema de cada autovalor.
	Si <0 , no se hace este cálculo
NGC19 (55-57)	Sección eficaz macroscópica
	Si >0 , solamente serán usadas secciones eficaces macroscópicas en la sección 008.
NGC20 (58-60)	-
NGC21 (61-63)	Dirección de flujo refrigerante (IEDG15 y JEDG15 de la sección 002):
	0 - Izquierda a derecha.
	0 - Izquierda a derecha.
	1 - Derecha a Izquierda.
	2 - Arriba hacia abajo.
	3 - Abajo hacia arriba
	4 - Frente hacia atrás.
	5 - Atrás hacia el frente.
NGC22 (64-66)	Calcula e imprime los datos de neutrones retardados cada vez que se obtiene la tasa de reacción total en los nucleidos (IEDG7).
NGC23 (67-69)	Obliga I/O para problemas iterativos. No es usado generalmente.
NGC24 (70-72)	Reservado para las rutinas especiales del usuario

Tarjeta 3: Opciones de edición (24I3)

Solo serán ejecutadas si el número de entrada es >0 .

IEDG1 (1-3)	Imprime los datos de iteración en cada barrido de las celdas.
IEDG2 (4-6)	Imprime densidad de nucleidos finales.
IEDG3 (7-9)	Imprime secciones eficaces macroscópicas transferidas grupo a grupo.
IEDG4 (10-12)	Imprime tasa de reacción de secciones eficaces macroscópicas.
IEDG5 (13-15)	Imprime el balance neutrónico total del sistema por grupo.
IEDG6 (16-18)	Imprime el balance neutrónico total de neutrones por zona y por grupo.
IEDG7 (19-21)	Imprime la tasa de reacción total en nucleidos individuales.

IEDG8 (22-24)	<0, imprime tasas de reacción en nucleidos individuales por zona y clase de zona; >0, imprime tasas de reacción por nucleido y zona.
IEDG9 (25-27)	Imprime los valores de flujos promedio por grupo (IEDG6 = 0)
IEDG10 (28-30)	Imprime los valores de flujos puntuales por grupo
IEDG11 (31-33)	-
IEDG12 (34-36)	Imprime los valores de las densidades de potencia promedio por zona.
IEDG13 (37-39)	Imprime los valores de las densidades de potencia relativas transversales a lo largo del pico.
IEDG14 (40-42)	Imprime los valores de las densidades de potencia puntuales.
IEDG15 (43-45)	Imprime el valor del calor acumulado depositado en el refrigerante.
IEDG16 (46-48)	Imprime los valores de las densidades neutrónicas puntuales sumadas sobre todas las energías (requiere datos 1/v).
IEDG17 (49-51)	Número del nucleido; imprime tasas de absorción neutrónica puntuales en este nucleido si es >0.
IEDG18 (52-54)	-
IEDG19 (55-57)	-
IEDG20 (58-60)	-
IEDG21 (61-63)	-
IEDG22 (64-66)	-
IEDG23 (67-69)	-
IEDG13 (70-72)	Reservado para las rutinas especiales del usuario.

Tarjeta 4: Conteo de iteración general y tiempo de cálculo de la máquina (24I3)

Los primeros números de esta tarjeta son los límites de conteo y de iteración para varios loops de cálculo. Los problemas se terminan cuando el conteo de la iteración alcanza el límite y el cálculo procede como para NGC15 (Tarjeta2). Para problemas estadísticos, solamente se aplica ITMX1, ITMX19 e ITMX21.

ITMX1 (1-3)	Problema inicial de autovalores (inicialización). (200 ²)
ITMX2 (4-6)	Otros problemas de autovalores (100).
ITMX3 (7-9)	Cálculo de periodo de tiempo de loop (10).
ITMX4 (10-12)	Periodo de tiempo Repeat (2).
ITMX5 (13-15)	Ciclo Repeat (3).
ITMX6 (16-18)	-
ITMX7 (19-21)	-
ITMX8 (22-24)	-
ITMX9 (25-27)	-
ITMX10 (28-30)	-
ITMX11 (31-33)	-
ITMX12 (34-36)	-
ITMX13 (37-39)	-
ITMX14 (40-42)	-
ITMX15 (43-45)	-
ITMX16 (46-48)	-
ITMX17 (49-51)	-
ITMX18 (52-54)	-
ITMX19 (55-57)	Problema de autovalores inicial (60) ³
ITMX20 (58-60)	Otros problemas de autovalores (30)
ITMX21 (61-63)	Loop de reactividad (60)
ITMX22 (64-66)	Período de tiempo del loop Repeat (30)
ITMX23 (67-69)	Ciclo del loop Repeat (60)
ITMX24 (70-72)	Tiempo máquina total (120)

Tarjeta 5: Restricciones generales (6E12.0)

El cálculo terminará si no son dadas las siguientes restricciones, excluyendo GLIM5.

GLM1 (1-12)	Factor de multiplicación máximo (1.5)
GLM2 (13-24)	Factor de multiplicación máximo mínimo (0.5) ⁴

² Los números mostrados en parentesis son reemplazados por datos de entrada diferentes de cero.

^b Los tiempos máquina de las IBM-360/75 se muestran aquí. Estos se dividen por 5 para las máquinas IBM-360/91 y pueden cambiar para algunos valores de entrada.

GLM3 (25-36)	Búsqueda de densidad de nucleidos máxima (10^{10})
GLM4 (37-48)	-
GLM5 (49-60)	Factor aplicado a la producción de neutrones para generar un archivo
GLM6 (61-72)	Factor de multiplicación realizada si NGC10 < 0.

Sección 002: NO USADA

Sección 003: Descripción del problema de flujo neutrónico

Tarjeta 1: 003

Tarjeta 2: Descripción general (24113)

NUAC1 (1-3) Tipo de aproximación de flujo:

0 - Teoría de difusión de diferencias finitas.

1 -

2 -

3 -

4 -

NUAC2 (4-6) Inicialización del flujo para el problema. Es aplicable solamente para un reinicio de cálculo, NGC2 \neq 0.

0 - Uso del flujo disponible, del factor de multiplicación y de los parámetros de aceleración desde un problema previo.

1 - Usa solamente flujos desde un cálculo previo.

2 - Usa procedimientos de inicialización para continuar un problema estático (NGC2 < 0).

NUAC3 (7-9) -

NUAC1 (10-12) Geometría:

1. – Slab unidimensional (X).

2. – Cilindro unidimensional(R).

3. – Esfera unidimensional(R).

⁴ También se usa para el fin de ciclo del factor de multiplicación cuando el k_{eff} es punto flotante (no búsqueda).

	4. –
	5. –
	6. – Plancha bidimensional(X, Y).
	7. – Cilindro bidimensional(R, Z).
	8. – Círculo bidimensional (θ , R).
	9. – Hexágono bidimensional (H).
	10. – Triangulo bidimensional (T).
	11. – Plancha tridimensional(X, Y, Z).
	12. – Cilindro tridimensional (θ , R, Z).
	13. – Hexágono tridimensional (H, R).
	14. – Triangulo tridimensional (T, Z).
NUAC6 (16-18)	-
NUAC7 (19-21)	-
NUAC8 (22-24)	Indica simetría diagonal 2D (En planos si es 3D): Si >0 , hay simetría sobre la diagonal empezando en la esquina superior izquierda y con el mismo número de filas y columnas; Si <0 , hay simetría de diagonal invertida. Es 0 si NUAC11 es -1.
NUAC9 (25-27)	Indica simetría bidimensional a lo largo de las ranuras de la columna. Solo para problemas 3D.
NUAC10 (28-30)	-
NUAC11 (31-33)	Condición de frontera izquierda (Siempre requerida) -1 - Periódica ⁵ 0 - Extrapolada 1 - Reflejada
NUAC12 (34-36)	- Condiciones de frontera superior (requerida para 2 - D) 0 - Extrapolada 1 - Reflejada
NUAC13 (37-39)	Condiciones de frontera derecha (siempre requerida), es -1 si NUAC11 es -1 0 - Extrapolada 1 - Reflejada 2 - Simetría rotacional de 90° (frontera de derecha hacia

⁵ Condiciones de frontera solo para geometrías dadas por NUACs = 1, 6, 8, 11 y 12.

	abajo. Solo laminar).
	3 - Reflexión invertida (Simetría rotacional de 180° . Solo laminar).
NUAC14 (40-42)	Condiciones de frontera Inferior (requerida para 2-D)
	0 - Extrapolada
	1 - Reflejada
NUAC15 (43-45)	Condiciones de frontera Frontal (requerida solo para 3-D)
	0 - Extrapolada
	1 - Reflejada
NUAC16 (46-48)	Condiciones de frontera Posterior (requerida solo para 3-D)
	0 - Extrapolada
	1 - Reflejada
NUAC17 (49-51)	Número de zona para un absorbedor negro interno y con la condición de frontera de no-reingreso de flujos aplicado a sus bordes (XMIS2).
NUAC18 (52-54)	Opción para flujo de neutrón negativo si es mayor que cero (> 0).
NUAC19 (55-57)	Sobrescritura de los polinomios de Chebychev en el ajuste de los parámetros de aceleración si es mayor que cero (> 0).
NUAC20 (58-60)	Líneas de relajación solamente en filas si es mayor que cero (>0). Si es -1 , forzaría la dirección de las líneas de relajación en filas y columnas, y también en la proa y popa para el caso 3-D. Si es -2 , se usa solamente sobre filas y columnas. Cuando no especificamos, el código selecciona las líneas de relajación sólo en filas iterando interiormente para todos los problemas relacionados con upscattering. Si la entrada es otro número, hay tres iteraciones internas para problemas 3-D sin datos I/O y cinco con datos I/O durante la iteración, alternando la dirección de las líneas de relajación para los problemas 2-D.
NUAC21 (61-63)	-
NUAC22 (64-66)	-
NUAC23 (67-69)	Numero de iteraciones internas. Normalmente no indicada (NUAC 20).
NUAC24 (70-72)	-

Tarjeta 3: Convergencia de iteración (6E12.0)

- EPI1 (1-12) Cambio de flujo relativo máximo para la última iteración de cada problema de autovalor inicial (0.0001⁶)
- EPI2 (13-24) Cambio de flujo relativo máximo en el autovalor para la última iteración de los problemas de autovalores. Esto se aplica al cálculo del factor de multiplicación y al buckling directo, 1/v, o al parámetro de búsqueda del nucleido.
- Para el loop de búsqueda de reactividad (NSRH = 2 o 3) esta es la diferencia máxima entre el último factor de multiplicación calculado y el factor de multiplicación deseado (0.00001).
- EPI13 (25-26) -
- EPI14 (37-48) - Reemplaza EPI1 para todos los autovalores excepto aquellos de inicialización o estacionarios (0.0001).
- EPI15 (49-60) -
- EPI16 (61-70) -

Tarjeta 4: Datos misceláneos (6E12.0)

- XSIS1 (1-12) Constante de frontera extrapolada externa $\left(-\frac{D}{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^7$
- >0 - Especifica la constante para todas las fronteras extrapoladas (NUAC 11-16) para todos los grupos.
- <0 - Número total de grupos de energía (negativo). Las demás tarjetas seguirán a esta, la cual entrega las constantes de frontera extrapolada (6E12.0). De esta manera por la condición de periodicidad (NUAC11 = -1), para problemas de 1-D, sólo se requieren datos de frontera de la izquierda y de la derecha, cuatro fronteras para 2-D,

⁶ Una fuerte convergencia es requerida en algunas situaciones.

⁷ Con $-\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\phi_b}{e}$ donde el subíndice *b* denota la frontera, *e* es la longitud de extrapolación, la

constante requerida $\frac{D}{e}$, o $\frac{1}{e \Sigma_{tr}}$; da un flujo cero sobre la frontera. pero un valor de 0.4692 es recomendado. generalmente.

y seis fronteras para problemas 3-D.

0 - El código utilizará el valor dado para todas las fronteras extrapoladas (0.4692).

XMIS2 (13-24) - Constante de Frontera de absorbedor negro interno $\left(-\frac{D}{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x}\right)$

>0 - Constante para todos los grupos de la zona NUAC17.

<0 - Número total de grupos (negativo). El valor cero indica que la condición de la barra no es aplicable para este grupo.

0 - El código usará el valor dado para todos los grupos y el absorbedor será negro sobre todas las energías (0.4692).

XMIS3 (25-36) - Nivel de potencia del núcleo, Mw.

Si las secciones eficaces han sido dadas pero no hay datos de watts/fisión (sección 008), este valor será la tasa de producción total de neutrones (n/s).

XMIS4 (37-48) - Factor de conversión.

Razón de energía térmica de fisión a energía de fisión [XMIS3 se divide por este valor. Normalmente es < 1.0].

XMIS5 (49-60) - Fracción del núcleo considerado; las masas restantes y XMIS3 son divididos y multiplicados respectivamente por este número (1.0).

XMIS6 (61-72) - Factor inicial de sobrerrelajación, normalmente calculado por el código y no especificado aquí.

Sección 004: Descripción de la geometría de la malla

Tarjeta 1: 004

Tarjeta 2: Número de puntos de malla y ancho de cada región vertical yendo de izquierda a derecha. Para problemas bidimensionales también se especifica el número de puntos de la malla y el ancho de cada región horizontal, yendo desde arriba hacia abajo y comenzando con una nueva tarjeta. Para un caso tridimensional se especifica el número de puntos de malla y el ancho de cada región, yendo desde el frente hacia atrás. Referente a la geometría de la malla, las filas de los puntos de las mallas

van desde arriba hacia abajo, las columnas de los puntos de las mallas van desde la izquierda a la derecha, y los planos de los puntos de la malla van desde el frente hacia atrás.

Los datos finalizan para cada sección transversal con una entrada en blanco. Si la última tarjeta es llenada para alguna sección transversal, se requiere pasar a otra tarjeta.

Sección 005: Especificación de las zonas en el reactor

Tarjeta 1: 005

Tarjeta 2+: (24I3)

Número de zona (región de composición uniforme) de cada región vertical para la primera fila horizontal, yendo de izquierda a derecha. Comenzando una nueva tarjeta, especificamos los números de zonas de cada región vertical en la segunda fila horizontal. Se continúa así, desde arriba hacia abajo. Para problemas unidimensionales los números de zona son sólo especificados para una región horizontal. Para casos 3-D, especificamos la grilla bidimensional para cada bloque de planos de la malla yendo desde el frente hacia atrás. La sección eficaz se introduce luego asociado con la zona numerada 1 como referencia. Es conveniente enumerar las zonas que contienen el mismo material consecutivamente.

Sección 008: (Σ) Secc. Eff. Macrosc. - Teoría de difusión

Usamos como entrada secciones eficaces macroscópicas o microscópicas, pero no ambas. Las secciones eficaces macroscópicas deben proporcionarse desde un archivo de entrada (con extensión *.31).

Tarjeta 1: 008

Tarjeta 2: Número de grupos y rango de dispersión (3I3)

KMAX (1-3) - Número de grupos de energía.

IX28 (4-6) - Número de grupos de downscatter.

IX29 (7-9) - Número de grupos de upscatter.

Tarjeta 3: Secciones eficaces (2I6, 5E12.0)

M (1-6) - Número de zona.

K (7-12) - Número de grupo.

SIG1 (13-24) - Coeficiente de difusión.

SIG3 (25-36) - Sección eficaz de absorción.

SIG4 (37-48) - Sección eficaz de producción ($\nu \Sigma_f$).

SIG5 (49-60) - $1/v$ Sección eficaz para modo de cálculo primario.

SIG7 (61-72) - Potencia por unidad de flujo. Si todas las entradas aquí son cero, entonces se usa $\nu \Sigma_f$ (SIG4).

Tarjeta 4: Secciones eficaces de dispersión (6E12.0)

Describe la sección eficaz de dispersión desde el grupo K para cada uno de los otros grupos que van de 1 a KMAX. El código continúa la lectura de las tarjetas 3 y 4 hasta encontrar una tarjeta en blanco.

Tarjeta 5: Función distribución de fuente de fisión (6E12.0)

Especifica la fracción de neutrones de fisión que nacen en los grupos 1 a KMAX.

4. DESCRIPCIÓN DEL REACTOR RP-10

El reactor nuclear de investigación RP-10 es un reactor de 10 Mw. de potencia térmica, tipo piscina, con elementos combustibles tipo MTR (Material Testing Reactor) que utiliza combustible enriquecido al 19.75% de uranio-235. Utiliza agua liviana como moderador y refrigerante, así como grafito y berilio como reflectores.

La piscina contiene al núcleo, las facilidades de irradiación del circuito primario, las barras de

Control y determinada instrumentación del reactor. (Ver figura 5):

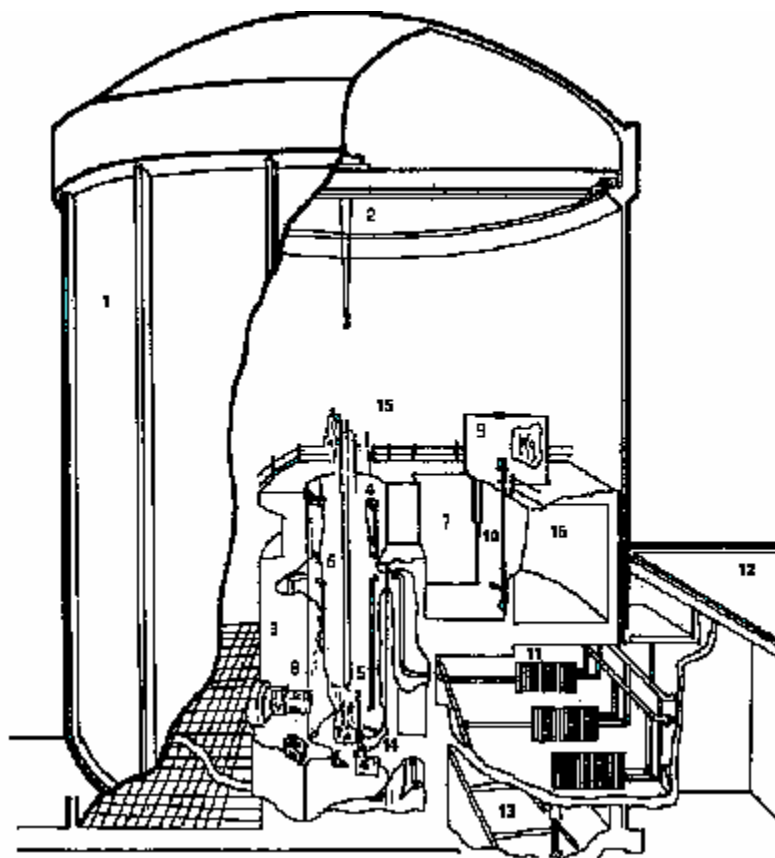


Fig. N° 5. Corte vertical del edificio de contención del reactor RP-10

1. Edificio de contención	2. Grúa polar	3. Bloque del reactor	4. Tanque del reactor
5. Núcleo	6. Barras de Control	7. Pileta auxiliar	8. Columna térmica
9. Celda caliente	10. Periscopio	11. Intercambiadores de calor	12. Edificio secundario (sala de máquinas)
13. Cañerías de circuito Primario	14. Conducto de irradiación	15. Puente mecánico de barras	16. Tanque de reserva

4.1 CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES DEL DISEÑO

CARACTERISTICAS GENERALES	
1. Tipo de reactor	Tipo MTR de Tanque abierto (piscina) con combustible de Uranio enriquecido al 19.75%. Moderado y refrigerado con agua liviana, reflejado con grafito y berilio.
2. Potencia nominal	10 MW
3. Propósito	a) Producción en escala comercial de radioisótopos b) Experimentación e investigación básica y aplicaciones tecnológicas
4. Ubicación	Pampas de Huarangal, Distrito de Carabaillo. Lima, Perú.
5. Propietario y operador	Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN).
6. Diseñador y constructor	Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA).
7. Estado actual	Operación Normal (rutinaria)
8. Tiempo promedio entre generaciones (*)	$l = 59 \mu\text{seg.} \pm 10\%$
RECIPIENTES DEL REACTOR Y DIMENSIONES	
9. Forma, material y dimensiones	Tanque principal cilíndrico de acero inoxidable de 4m de ϕ y 11,2m de altura, en posición vertical y con su extremo superior abierto.
10. Presiones de trabajo	$\approx 11 \text{ m.c.a.}^a \times 4 \text{ m (diámetro)}$
11. Reactor con blindaje	11 m (altura) x 4 m (diámetro)
REFLECTOR Y BLINDAJE	
12. Reflector	Grafito, agua liviana y berilio
13. Blindaje	Laterales: Agua+Hor. Parte superior: Agua base: Agua + hormigón
CONTENCIÓN	
14. Tipo y material	Hall de 32.80 m de altura; 28 m de ϕ y 0.40 m de espesor: bloque central

^a Metros de columna de agua. $10.33 \text{ m.c.a} \approx 1.013 \text{ bar}$

	prismático con paredes de concreto reforzados, techo y sin aberturas externas.
TRATAMIENTO DE AGUA	
15. Desmineralizador	Una unidad; caudal normal: 25m ³ /h; se alimenta desde el circuito primario por derivación.

(*) Valores validos para el núcleo típico de trabajo, integrado por 29 elementos combustibles.

4.2 ESTRUCTURA DEL REACTOR

Entre los principales componentes del reactor podemos mencionar a los siguientes:

- Reactor piscina / vaso
- Soporte del núcleo, grilla
- Puente del reactor
- Reflectores
- Blindajes (incluyendo blindajes movibles para las facilidades de irradiación)
- Soportes para la instrumentación del núcleo
- Tubos de irradiación

Para mayor información de los principales componentes del reactor ver referencia [13].

4.3 COMPONENTES DEL NÚCLEO

El núcleo típico de trabajo se encuentra constituido por 24 elementos combustibles normales, 5 elementos combustibles de control y una caja central de irradiación. La configuración se establece de 685 celdas o elementos unitarios. Esta configuración se complementa con los reflectores de grafito y Berilio entre las cuales se insertan cajas denominadas posiciones de irradiación externa, entre estos elementos se encuentra también el elemento que aloja la barra de control fino. El resto de orificios de la grilla se cierran con tapones para conseguir que el núcleo del reactor se refrigere adecuadamente.

Entre los principales componentes del núcleo se tiene:

ELEMENTO REFLECTOR DE BERILIO.- El elemento de Berilio esta constituido de berilio estándar grado nuclear (HP-20 SNG), los extremos inferiores están diseñados de tal forma que pueden ser insertados en cualquiera orificio de la grilla. Las dimensiones de un elemento de berilio son 67*81.24*665 mm³ y el espesor

de las placas laterales de aluminio es de 4.5 mm.

ELEMENTO REFLECTOR DE GRAFITO.- El grafito está encapsulado con aluminio, cuyo espesor es de 3 mm. Entre el grafito y el aluminio hay un gap de 0.25 m de espesor. Los extremos inferiores de los elementos de grafito son similares a los elementos de berilio y pueden insertarse en cualquier orificio de la grilla. Las dimensiones del elemento reflector de grafito son $76*78.74*699 \text{ mm}^3$.

BARRA DE CONTROL FINO Y ELEMENTO RECEPTOR.- El elemento receptor consiste de dos bloques de grafito encapsulados en aluminio de 3 mm. de espesor, entre los dos bloques grafito hay una separación de 3 mm. para aceptar la placa absorbidora de 2 mm. de espesor.

CAJA DE IRRADIACIÓN.- La caja de irradiación esta hecha de aluminio con una sección transversal de $81.24*76 \text{ mm}^3$, el espesor de aluminio de las dos placas laterales es de 4.5 mm. y las otras dos de 1.9 mm. de espesor. Dichas placas están arregladas perpendicularmente unas a otras formando la caja, la longitud total de la caja es de 935 mm.

4.4 ELEMENTOS COMBUSTIBLES

ECN: Las placas internas están compuestas de AlMg y de láminas del mismo material, las cuales encierran las placas del meat. El meat consiste de una dispersión de aluminio en U_3O_8 . La densidad de Uranio en el meat es de 2.296 g/cm, lo cual está debajo del límite superior de la densidad para este tipo de combustible que es de 3.20 g/cm^3 . La carga por elemento es de 280 g U_{235} . Para cada placa es de 17.5 g U_{235} . El enriquecimiento es de 19.75 de porcentaje en peso de U_{235} .

4.5 CÁLCULO DEL REACTOR

Para el cálculo de reactor se usa el código de cálculo neutrónico CITATION [11] con modelos a 2D y 3D del núcleo del reactor. Los resultados producidos por este código son procesados con el software WIMCIT, pudiéndose obtener la siguiente información:

- (1) Cálculos de distribución de Flujos Neutrónicos
- (2) Cálculos de Potencia
- (3) Cálculos de Quemado
- (4) Cálculos de Factores de Pico, entre otros.

5. DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA WIMCIT

El **WIMCIT** fue desarrollado en los laboratorios del departamento de Cálculo, Análisis y Seguridad del IPEN, para el cual se dispuso de una PC Pentium II de 300 MHz.

5.1 REQUERIMIENTOS DE SOFTWARE

El programa hace uso de las siguientes herramientas:

❑ **SISTEMAS OPERATIVOS:**

Windows95, Windows98, Windows2000, DOS.

❑ **SOFTWARES:**

- **Delphi 5.0 Trial:** Lenguaje Pascal orientado a objetos [18].
- **TeeChart 5.0 Trial :** Paquete de componentes gráficos para Delphi5.0

❑ **CÓDIGOS DE CÁLCULO:**

- **WIMS:** Código de cálculo de celdas.
- **CITATION:** Código de cálculo Neutrónico.

5.2 DETALLE DEL DESARROLLO DEL WIMCIT

DESCRIPCIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO.- A continuación detallamos como funciona el diagrama de flujo del **WIMCIT** (Fig.4) partiendo desde la esquina superior izquierda:

- ❑ Archivo ***.out (WIMS):** Salida del WIMS que nos da la información de la celda y que nos servirá para elaborar nuestras librerías de secciones eficaces.
- ❑ Archivo ***.cnf:** Contiene información de la configuración del núcleo.
- ❑ Archivo ***.lib.** (Librería de quemado) Contiene información del quemado de los elementos combustibles y su ubicación en el reactor.
- ❑ Subrutina **CONFIG:** Lee la configuración del Núcleo, sus librerías asociadas y condiciones de irradiación.
- ❑ Subrutina **INTERPOL:** Usando la interpolación de NEWTON [19], interpola los valores de las secciones eficaces y de quemado para la simulación de cada caso.
- ❑ Archivo ***.dat** (Entrada para la tarjeta 005 del CITATION) Contiene información de la geometría del núcleo del reactor.
- ❑ Archivo ***.31** (Entrada para la tarjeta 008 del CITATION) Contiene información de las secciones eficaces a valores de potencia y quemado de los elementos del núcleo.

- ❑ Subrutina **CALLCIT**: Llamada al código de cálculo CITATION.
- ❑ Archivo ***.out** (Salida del CITATION) Contiene información del cálculo neutrónico realizado.
- ❑ Subrutina **PROPEAK**: Calcula el factor pico desde la salida del CITATION.
- ❑ Subrutina **PROBURN**: Genera el mapa de quemado del núcleo.
- ❑ Subrutina **PROFLU**: Genera el mapa de flujos del núcleo.
- ❑ Subrutina **PROPOT**: Genera el mapa de potencias del núcleo.
- ❑ Subrutina **GRAF**: Grafica los perfiles de flujos, mapas de potencia, quemado y flujos en 2 y 3 dimensiones.

Diagrama del programa WimCit

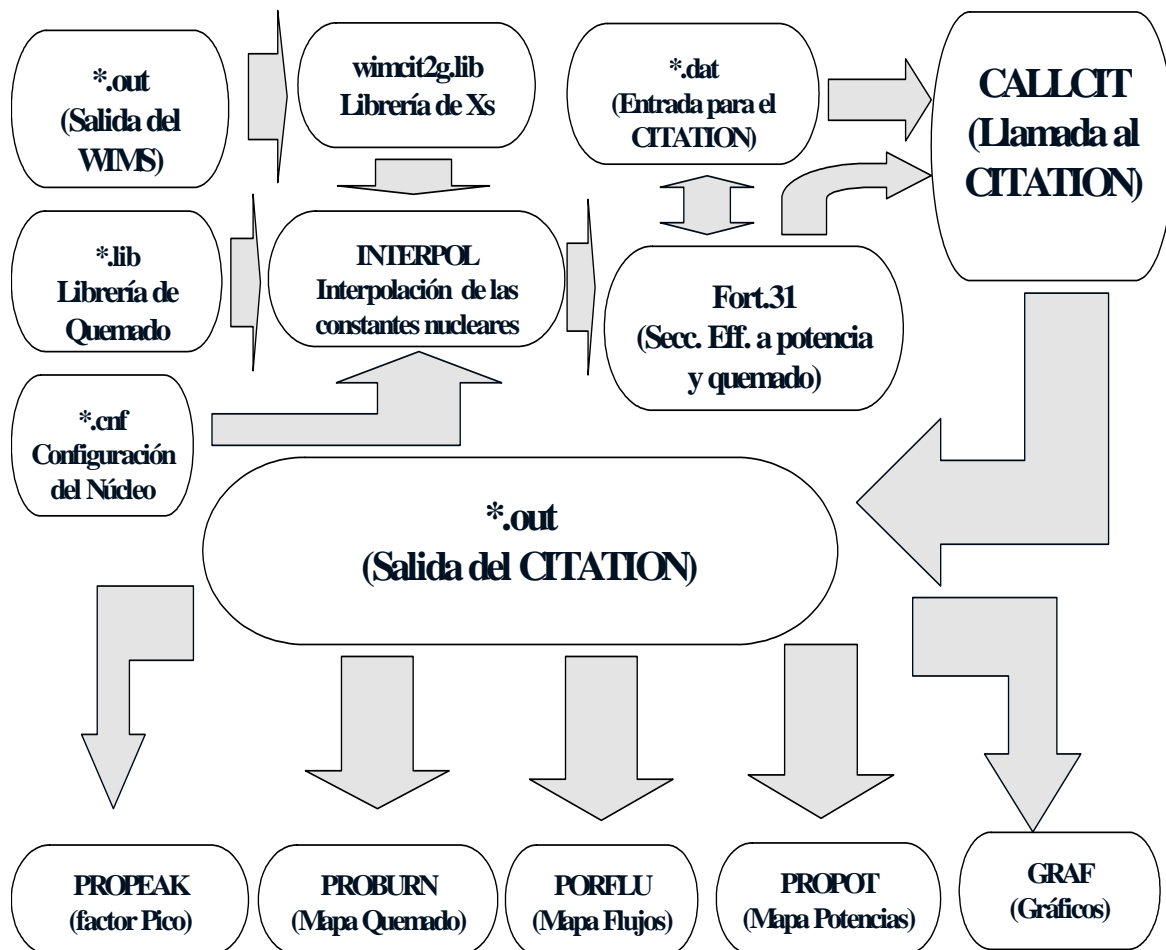


Fig. N°6 Diagrama de flujo del WIMCIT

5.3 DOCUMENTACIÓN DEL WIMCIT

La siguiente es una tabla en donde se esquematizan las diferentes unidades en las que está el código fuente de nuestro proyecto.

ARCHIVO (UNIDAD)	*.PAS (KB)	*.DFM (KB)	.EXE (KB)	*.DCU (KB)	FUNCIONES
U031	32.0	-	-	30.0	Genera archivos .Fort y *.dat .
UAbout	2.0	3.0	-	5.0	Versión y enlace a la URL del grupo.
UBurnMap	4.0	5.0		9.0	Grafica porcentaje de quemado por celda.
UCdIrrad	4.0	12.0	-	9.0	Condiciones de operación del núcleo.
UColFlux	7.0	8.0		14.0	Grafica perfil de flujos por filas.
UDatos	11.0	-	-	14.0	Genera mapa de quemado.
UDialog	15.0	-	-	17.0	Rutinas adicionales, f. pico en 2D y 3Dim.
UFluxAxial	7.0	9.0		14.0	Grafica perfil de flujos axiales por celda a través de los 21 planos.
UGraf3D	5.0	8.0		10.0	Grafica flujos en 3D por planos.
ULibs	2.0	10.0	-	6.0	Especifica las librerías a usar.
UnitOut	41.0	-	-	43.0	Genera mapa de flujos y potencias.
UPotAxial	5.0	7.0		11.0	Grafica perfil de potencias axiales por celda a través de los 21 planos.
UPowerMap	4.0	5.0	-	9.0	Grafica de potencias por celda.
URichEdit	4.0	3.0	-	3.0	Manejador de documentos de texto.
URowFlux	6.0	8.0	-	13.0	Grafica perfil de flujos por columnas.
UTextAbout	1.0	3.0	-	4.0	Versión del manejador de textos.
UVar	3.0	-	-	5.0	Almacena constantes y variables.
UWimCit	68.0	11.0	-	84.0	Unidad principal que llama a las demás.
WIMCIT	18,864	-	-	-	Archivo de ayuda.
WimCit	68.0	-	-	-	Programa principal o Proyecto.
WIMCIT	-	-	1721.0	-	Programa de aplicación.

Tabla 1. Unidades o librerías del WIMCIT

RECOMENDACIONES PARA SU USO.- Para usar el **WIMCIT**, este debe estar instalado en el directorio “ C:\WimCit ”, el cual deberá ser creado si es que no existiera. Dentro de este directorio se ubicaran las siguientes librerías:

- wimcit2g.lib : Contiene los datos de secciones eficaces a 2 grupos.
- wimcit4g.lib : Contiene los datos de secciones eficaces a 4 grupos.
- wimcit2g.C2D : Contiene el modelo para el CITATION a 2 grupos y 2 dimensiones.
- wimcit4g.C2D : Contiene el modelo para el CITATION a 4 grupos y 2 dimensiones.
- wimcit2g.C3D : Contiene el modelo para el CITATION a 2 grupos y 3 dimensiones.
- wimcit4g.C3D : Contiene el modelo para el CITATION a 4 grupos y 3 dimensiones.

Y los siguientes programas:

- Citation.exe
- Run386.exe

La ejecución del programa muestra una ventana gráfica como la siguiente:



Fig. N° 7. Programa WIMCIT con el núcleo N14 cargado

6. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS CALCULADOS CON LOS REPORTES EXPERIMENTALES DEL NÚCLEO DE ARRANQUE DEL REACTOR NUCLEAR RP-10 A POTENCIA = 88.58 W^b

El cálculo se realizó a 2 grupos de energía en 2-D y 3-D obteniéndose los siguientes resultados.

6.1 TABLAS

TABLA N° 2 Flujo térmico (10^9 n/cm² . s) medido experimentalmente de la zona combustible del reactor por el laboratorio de Física de reactores [8]

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2					0.315	0.272	0.175			
3				0.984	0.407 (*)	0.464	0.290 (*)			
4				0.301	0.341		0.484	0.351		
5				0.293	0.268 (*)	0.494	0.536 (*)	0.399		
6					0.352	0.453	0.474			
7					0.341	0.412 (*)	0.357			
8										
9										
10										

TABLA N° 3 Flujo térmico (10^9 n/cm² . s) obtenido en la zona combustible del reactor por el programa WIMCIT

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2					0.367	0.364	0.367			
3				0.821	0.529	0.555	0.529			
4				0.446	0.634		0.634	0.446		
5				0.462	0.618	0.683	0.618	0.462		
6					0.537	0.553	0.537			
7					0.395	0.442	0.395			
8										
9										
10										

(*) Valores de flujo térmico hallados mediante códigos de cálculo.

^b Para este caso no se encontró reportes de potencia y quemado generados.

6.2 GRÁFICAS

Fig. 6.2.1 PERFIL DE FLUJO TÉRMICO A LO LARGO DE LA COLUMNA E.

Los valores de los flujos por celda son mostrados a lo largo de una columna del reactor (E). Podemos notar el incremento del flujo en las celdas donde se ubican los elementos combustibles.

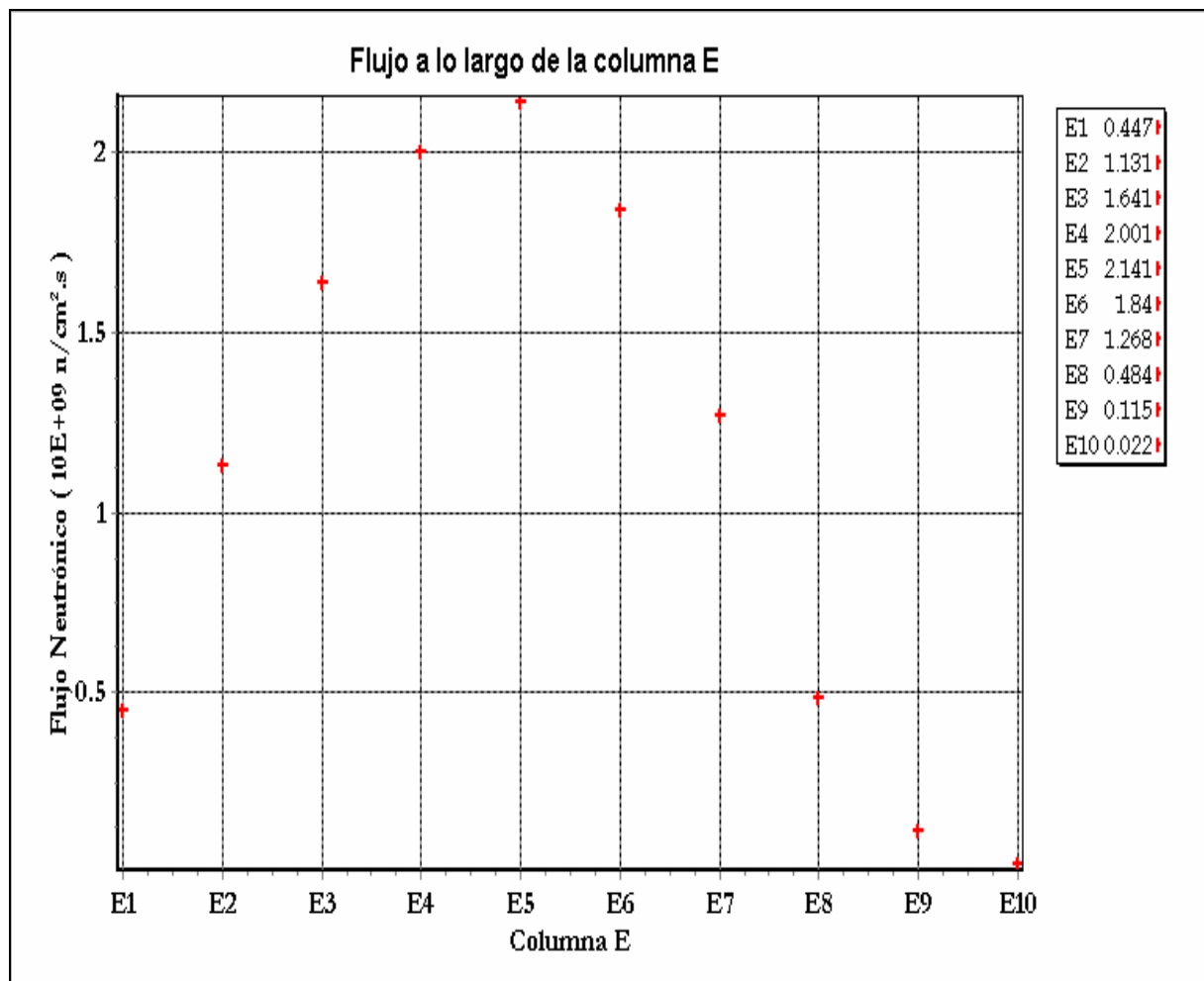


Fig. 6.2.2 PERFIL DE FLUJO TÉRMICO A LO LARGO DE LA FILA 5.

Los valores de los flujos por celda son mostrados a lo largo de una fila del reactor (5). Notamos también el incremento del flujo en las celdas donde se ubican los elementos combustibles.

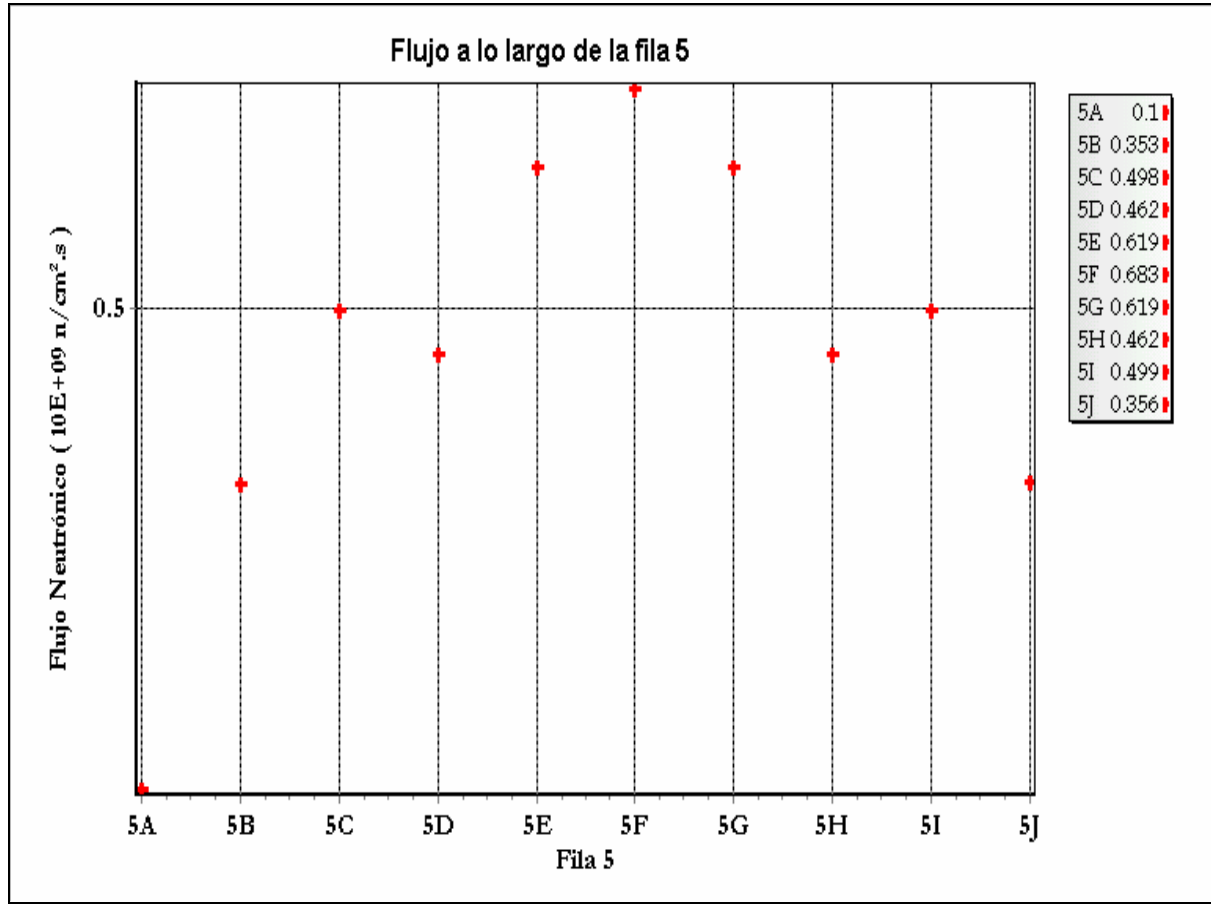


Fig. 6.2.3 QUEMADO AXIAL EN LA CELDA E4 A TRAVÉS DE LOS 21 PLANOS.

Visualización de la variación del quemado de combustible correspondiente a la celda E4 para cada uno de los 21 planos del reactor.

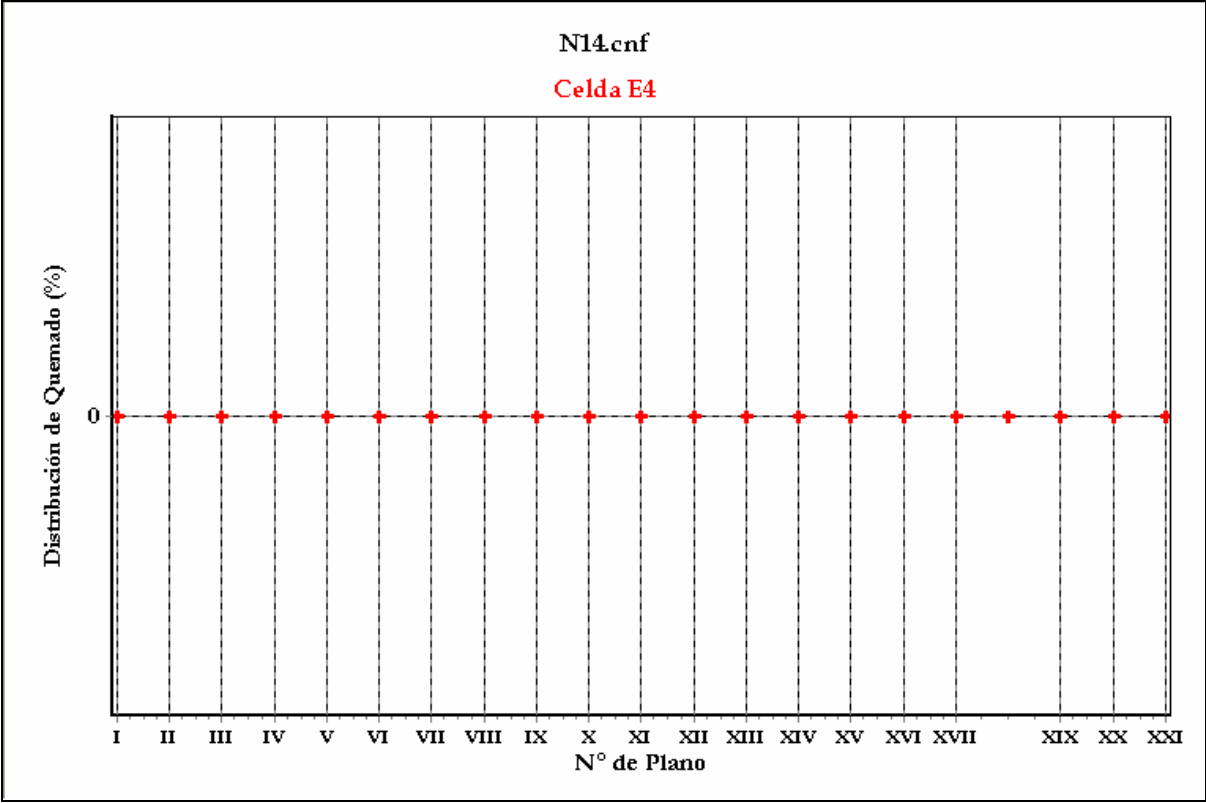


Fig. 6.2.4 POTENCIA AXIAL EN LA CELDA E4 A TRAVÉS DE LOS 21 PLANOS.

Visualización de la potencia generada por la celda E4 para cada uno de los 21 planos del reactor nuclear.

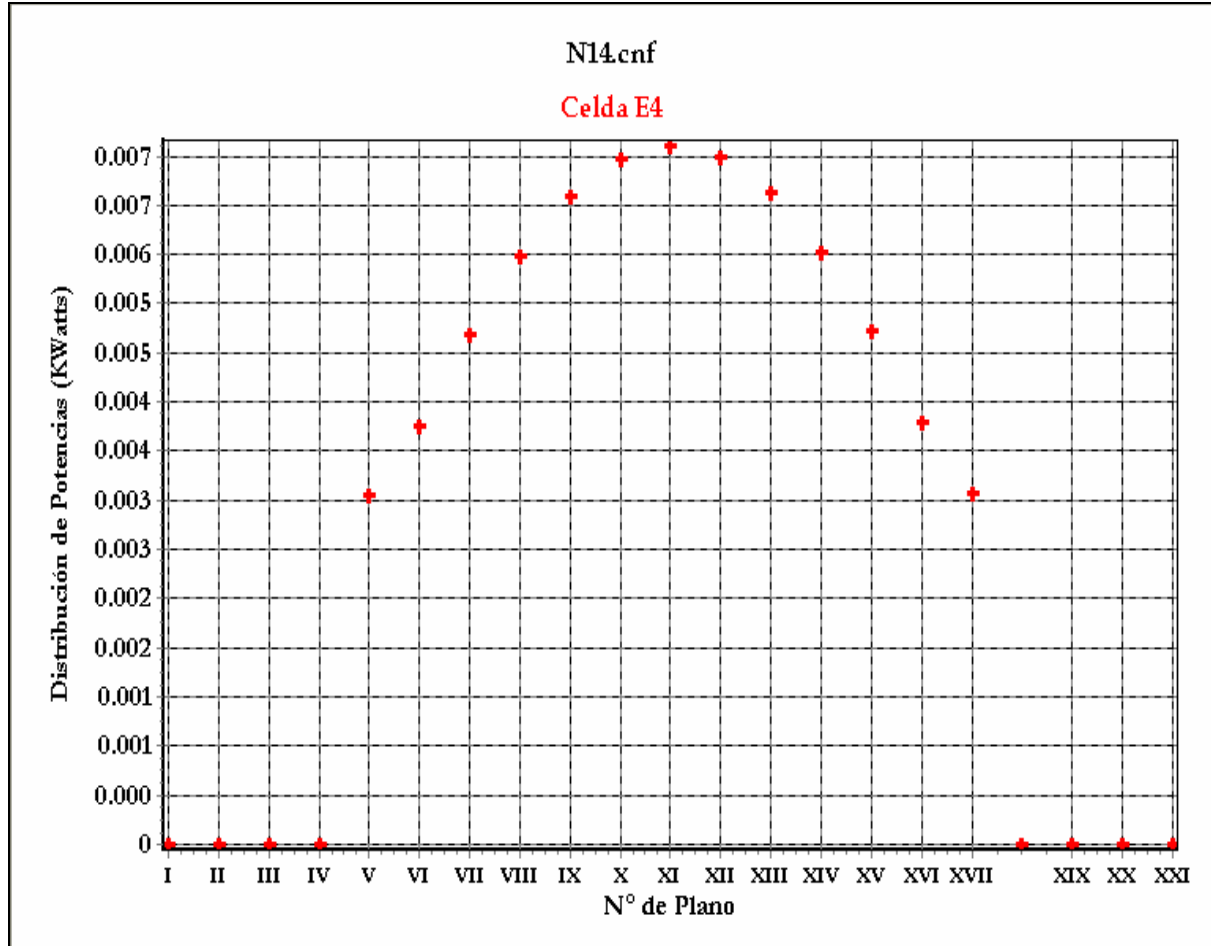


Fig. 6.2.5 FLUJO TÉRMICO AXIAL EN LA CELDA E4 A TRAVÉS DE LOS 21 PLANOS.

Visualización del flujo térmico en la celda E4 para cada uno de los 21 planos del reactor nuclear.

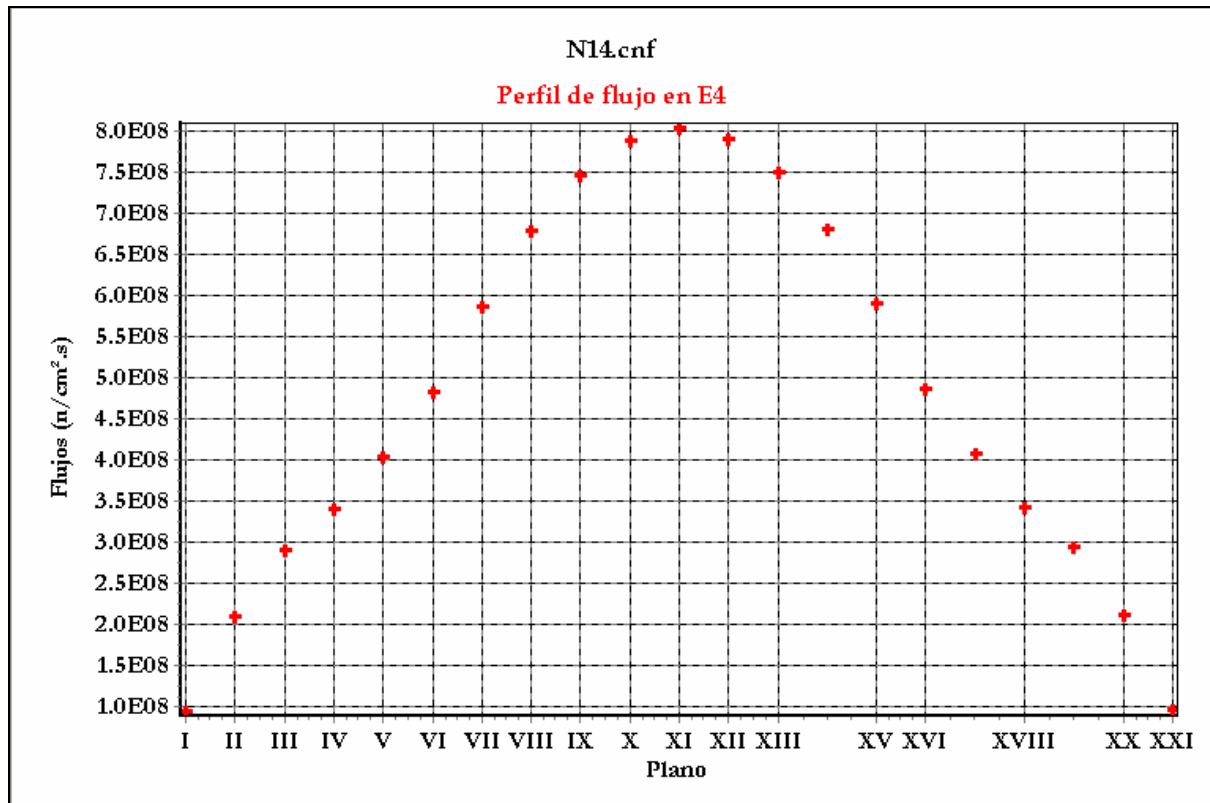
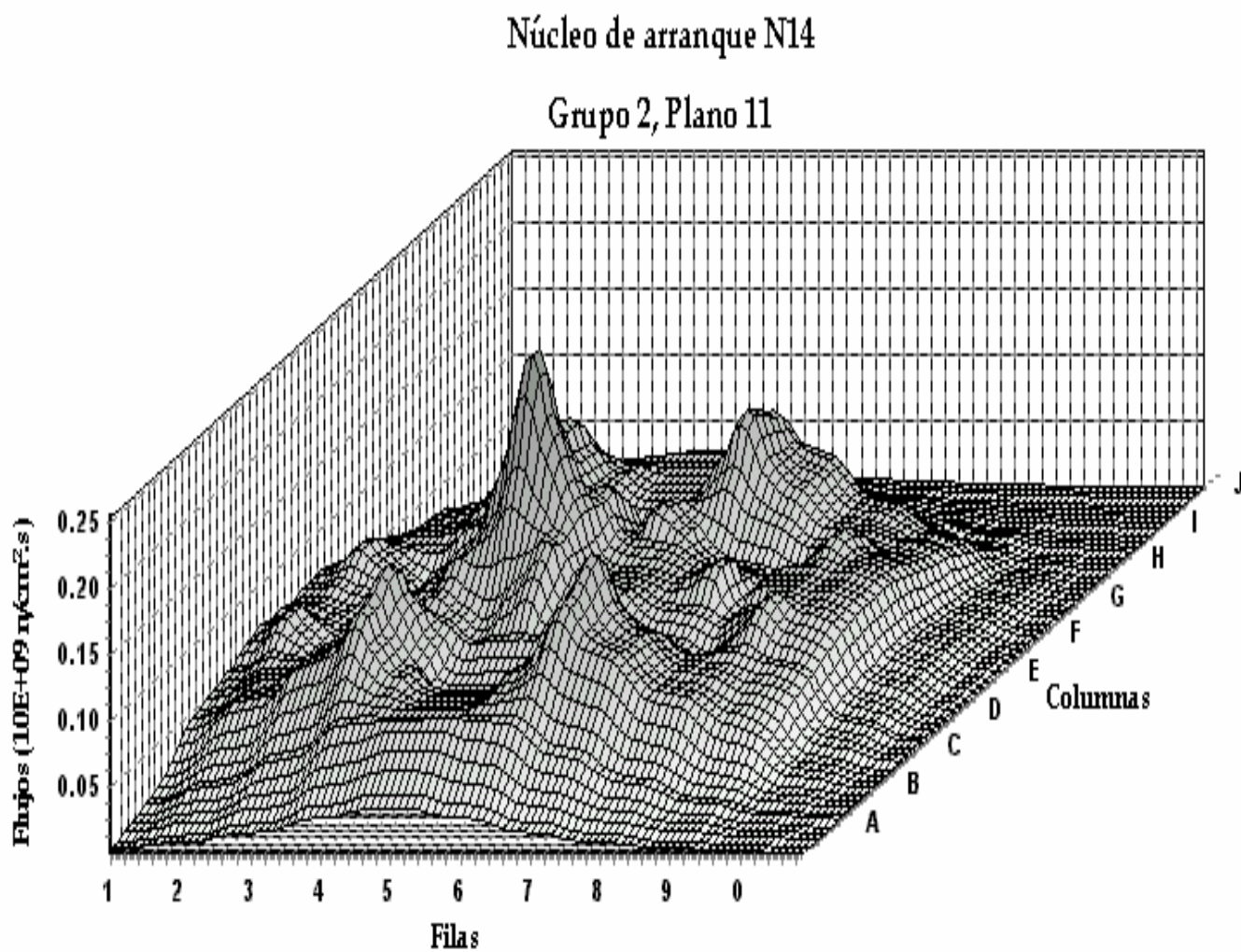


Fig. 6.2.6 MAPA DE FLUJO TÉRMICO EN EL PLANO 11.

Visualización del mapa superficial de flujo térmico en el núcleo del reactor nuclear.



Distancia a la grilla : 40.750

7. CONCLUSIONES

- ❑ Los cálculos realizados para el núcleo de arranque del reactor RP-10, nos indican que el programa desarrollado **WIMCIT** ingresa los datos al código CITATION en forma satisfactoria, sistematizando sus entradas numéricas correspondientes a la geometría y datos asociados al núcleo de arranque N14, reduciendo el error humano debido al procesamiento de gran cantidad de datos, así como reduce drásticamente las horas-hombre que se empleaban en un factor de 1/120
- ❑ Los resultados del cálculo efectuado por el código CITATION y luego procesados por el programa WIMCIT para el núcleo de arranque N14, son aproximadas a las mediciones realizadas para los elementos combustibles (ver tabla N° 2) dentro de la región térmica con discrepancias entre los valores experimentales y calculados que no superan el 20%, lo cual concuerda con la literatura existente. Esta afirmación se puede sustentar al notar que los elementos ECs (elementos combustibles) del núcleo inicial (fresco) del RP10 están rodeados por elementos de control que afectan en gran medida la distribución uniforme de flujos para los ECs.
- ❑ Las herramientas gráficas con las que cuenta el programa permiten visualizar el núcleo del reactor en 3 dimensiones (Fig. 6.2.6) para cada uno de los 21 planos en que se dividió su altura. Esta representación, nos permite también observar los altos valores (picos) del flujo en zonas donde hay una alta densidad neutrónica (y por consiguiente flujo) correspondiente a ECs (y también reflectores) y huecos donde la absorción es máxima.
- ❑ El programa WIMCIT también puede administrar los datos de entrada y salida correspondientes a las constantes nucleares para cualquier intervalo energético que pueda utilizar el código CITATION (Hasta ahora se han podido generar y ejecutar casos de hasta 4 grupos energéticos a 2 y 3 dimensiones obteniéndose buenos resultados). Estas librerías deben generarse con el código de cálculo de celdas WIMS y luego ser procesadas para finalmente mostrarse en el formato requerido por el código CITATION .

8. ALCANCES ADICIONALES DEL SOFTWARE

- ❑ Es importante dar a conocer que los alcances en materia de procesamiento de datos realizados en las salidas del código CITATION llegan hasta cálculos de quemado y potencia generada por las celdas combustibles. Estos valores se obtienen directamente del flujo neutrónico, siendo estos proporcionales a la masa del combustible, tiempo y potencia

de operación.

- Es posible obtener valores del factor pico siguiendo la metodología anterior y compararlos con otros reportes experimentales.
- Actualmente el programa WIMCIT se utiliza para calcular, analizar y verificar la gestión de combustible para el reactor RP-10. Sin embargo, las librerías wimcitNG.lib (librerías que almacenan los datos nucleares de las celdas para cada intervalo energético) en las cuales se implementarán los datos nucleares de los nuevos elementos combustibles serán completamente validados una vez que el IPEN adquiera un stock de tales elementos.
- El código de cálculo neutrónico CITATION nos permite además una variedad de cálculos en el reactor especificados en la descripción del código (parte 4), el cual sería interesante explorar y estar involucrado en otros proyectos de tesis.
- De otro lado se esta desarrollando la versión multiplataforma. Este proyecto llamado Kylix es un software adquirido por la Dirección General de Instalaciones del IPEN la cual servirá para el desarrollo de múltiples aplicaciones siguiendo la misma metodología del WIMCIT y que esta a la espera de otros desarrolladores que deseen trabajar en este campo.
- Finalmente de la misma manera se podría automatizar otros códigos como el MCNP (Simulación por el Método de Montecarlo), el cual es muy usado en el campo de disimetría, y así facilitar el tartamamiento de datos por parte del usuario.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **The atomic Nucleus**, Robley D. Evans, Mc Graw Hill, 1955.
- [2] **Introduction to Nuclear Reactor Theory**, Lamarsh John R., 2° Ed., *Addison-Wesley Publishing Co.*, N.Y., 1972. **CPC: sistema de calculo de reactores por PC**, Guarnizo Olivera J., IPEN - Centro Nuclear de Huarangal, Huarangal, Julio 1995.
- [3] **Nuclear Reactor Analysis**, James J. Duderstadt, Louis J. Hamilton, Department of Nuclear Engineering; The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 1975.
- [4] **Introduction to Physical Gas Dynamics**, W. G. Vincenti and C. H. Kruger, Jr., Wiley, New York, 1965.
- [5] **Statistical Mechanics**, K. Huang, Wiley, New York, 1963.
- [6] **Quantum Mechanics, Vol. I**, A. Messiah, John Wiley & Sons, New York, 1966.
- [7] **Quantum Mechanics**, 2nd Ed., Eugen Merzbacher, John Wiley & Sons, New York, 1970.
- [8] **Mathematical Physics**, Eugene Butkov, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1968.

- [9] **Mathematical Methods for Physicists**, G. Arfken, 2nd Ed., Academic, New York, 1970
- [10] **Wims code for cells calculations**, The ANSWERS Software Service, AEA Technology, Winfrith, Dorchester Dorset, DT2 8DH, United Kingdom, 1960.
- [11] **Nuclear reactor core analysis code: CITATION**, T. B. Fowler, D. R. Vondy, Union Carbide Corporation; Nuclear Division, OAK Ridge National Laboratory, Tennessee; USA, Marzo; 1972.
- [12] **Ingeniería de Reactores Nucleares**, S. Glasstone & A. Sesonske, *Editorial Reverté S. A.*, Barcelona, 1975.
- [13] **Core Analysis Report RP-10**, IPEN – Centro Nuclear, Huarangal.
- [14] **Certificates and Inspection records NUKEM**, 1984 Nukem GmbH Postfach 11 00 80, D-6450 Hanau 11, Tel. (6181) 500-1 Telex 4184113 nukd.
- [15] **Contrato de investigación No. 4702/RB-OIEA**; Juan Ávila, Raúl Carpio, Manuel Nieto. Lima Junio 1988.
- [16] **CPC: Sistema de Calculo de Reactores por PC**; Guarnizo J. IPEN – Centro Nuclear, Huarangal Julio de 1995.
- [17] **Determinación de la potencia del Reactor Nuclear RP10 para la puesta en servicio**; Bang M. T, Zúñiga A., Cerrón E., Lamas J., Centro Nuclear RACSO, Informe Interno, Huarangal, Perú, 1989.
- [18] **Object Pascal Language guide**, Borland Company, *pubsweb@borland.com.*; Copyright © 1999, Inprise Corporation. All rights reserved.
- [19] **Métodos Numéricos aplicados a la Ingeniería**, Terrence J. Akoi, © *Limusa Wiley; Noriega editores*, Universidad de Notre Dame, Balderas 95, México D.F., 1999.
- [20] **Métodos Numéricos y programación FORTRAN**, D. D. Mc Cracken, W. S. Dorn, Ed. Limusa, México, 1980.
- [21] **Delphi Programming**, Borland Company, *pubsweb@borland.com.*; Copyright © 1999, Inprise Corporation. All rights reserved.
- [22] **Calculo de factores pico radial, axial y total del núcleo N° 18 del RP-10**, Guizado Teobaldo R., Reporte técnico 006-98-DGI/DR/GCAS/NT, IPEN - Centro Nuclear de Huarangal, Huarangal, Diciembre 1998.

APENDICE A

BIBLIOTECA DE SECCIONES EFICACES A 2 GRUPOS DE ENERGIA PARA LOS ELEMENTOS DEL NÚCLEO DEL REACTOR RP-10

A continuación se presenta un extracto de las secciones eficaces a 2 grupos de energía para los elementos constituyentes del RP-10, la cual fue generada con el código de cálculo para celdas WIMS en las instalaciones del Laboratorio de Cálculo, Análisis y Seguridad.

2 1 1

8

0.000 0.01 0.1 0.5 1 5 10 12

Secciones eficaces a 2 grupos para los distintos elementos del núcleo del RP-10.

Para las zonas de placas combustibles (SFE y CFE) se calcularon las constantes en función del quemado y la potencia.

*** Zona de placas combustibles (ECN y ECC) ***

ID= CCN

P = 0.000

POT	IRRAD	U-235	GRUPO	DIFUSION	SIGA	SCATTERING (i --> j)		NUSIGF	SIGF
(Mw)	(MwD/T)	(g/cm3)		(cm)	(cm-1)	(cm-1)		(n*cm-1)	(cm-1)
<hr/>									
0.00	0.0	1.1622E-03	1	1.3714E+00	5.2774E-03	2.8740E-01	2.6417E-02	4.9534E-03	2.0043E-03
			2	2.5676E-01	1.0537E-01	4.4075E-04	1.4248E+00	1.8751E-01	7.7149E-02
<hr/>									
0.00	2970.0	1.1421E-03	1	1.3713E+00	5.2718E-03	2.8739E-01	2.6480E-02	4.8931E-03	2.0072E-03
			2	2.5660E-01	1.0524E-01	4.4005E-04	1.4256E+00	1.8526E-01	7.7213E-02
<hr/>									
0.00	5940.0	1.1220E-03	1	1.3713E+00	5.2622E-03	2.8738E-01	2.6515E-02	4.8293E-03	1.9807E-03
			2	2.5636E-01	1.0455E-01	4.3723E-04	1.4271E+00	1.8319E-01	7.6301E-02
<hr/>									
0.00	8910.0	1.1018E-03	1	1.3713E+00	5.2529E-03	2.8737E-01	2.6545E-02	4.7645E-03	1.9538E-03
			2	2.5611E-01	1.0376E-01	4.3396E-04	1.4288E+00	1.8113E-01	7.5414E-02
<hr/>									
0.00	14850.0	1.0616E-03	1	1.3713E+00	5.2355E-03	2.8734E-01	2.6603E-02	4.6332E-03	1.9279E-03
			2	2.5559E-01	1.0206E-01	4.2700E-04	1.4323E+00	1.7691E-01	7.4662E-02
<hr/>									
0.00	29700.0	9.6215E-04	1	1.3714E+00	5.1981E-03	2.8727E-01	2.6745E-02	4.3018E-03	1.8770E-03
			2	2.5425E-01	9.7480E-02	4.0818E-04	1.4417E+00	1.6591E-01	7.3282E-02
<hr/>									
0.00	44550.0	8.6273E-04	1	1.3714E+00	5.1677E-03	2.8721E-01	2.6896E-02	3.9607E-03	1.7391E-03
			2	2.5282E-01	9.2410E-02	3.8728E-04	1.4520E+00	1.5404E-01	6.8566E-02
<hr/>									
0.00	59400.00	7.6331E-04	1	1.3714E+00	5.1414E-03	2.8714E-01	2.7066E-02	3.6109E-03	1.5981E-03
			2	2.5129E-01	8.6907E-02	3.6449E-04	1.4631E+00	1.4127E-01	6.3514E-02
<hr/>									
0.00	74250.0	6.6389E-04	1	1.3714E+00	5.1022E-03	2.8708E-01	2.7271E-02	3.2483E-03	1.4540E-03

```

2 2.4964E-01 8.0932E-02 3.3964E-04 1.4752E+00 1.2760E-01 5.8127E-02
-----
0.00 89100.0 5.6447E-04 1 1.3713E+00 5.0561E-03 2.8700E-01 2.7518E-02 2.8757E-03 1.3050E-03
2 2.4785E-01 7.4666E-02 3.1339E-04 1.4881E+00 1.1332E-01 5.2379E-02
-----
0.00 103950.0 4.7086E-04 1 1.3711E+00 5.0149E-03 2.8692E-01 2.7809E-02 2.5097E-03 1.1518E-03
2 2.4599E-01 6.8077E-02 2.8556E-04 1.5016E+00 9.8422E-02 4.6368E-02
-----
0.00 133650.00 3.0796E-04 1 1.3705E+00 4.9453E-03 2.8676E-01 2.8503E-02 1.8616E-03 1.0093E-03
2 2.4228E-01 5.5960E-02 2.3347E-04 1.5276E+00 7.1076E-02 4.0587E-02
-----

ID= CCN
P = 0.01
-----
POT   IRRAD   U-235   GRUPO   DIFUSION   SIGA   SCATTERING (i --> j )   NUSIGF   SIGF
(Mw)  (MwD/T)  (g/cm3)              (cm)      (cm-1)      (cm-1)              (n*cm-1)   (cm-1)
-----
0.01  0.00   1.1622E-03 1 1.3714E+00 5.2774E-03 2.8740E-01 2.6417E-02 4.9534E-03 2.0043E-03
2 2.5676E-01 1.0537E-01 4.4075E-04 1.4248E+00 1.8751E-01 7.7149E-02
-----
0.01  2970.0 1.1401E-03 1 1.3713E+00 5.2682E-03 2.8739E-01 2.6485E-02 4.8859E-03 2.0074E-03
2 2.5658E-01 1.0513E-01 4.3963E-04 1.4258E+00 1.8499E-01 7.7229E-02
-----
0.01  5940.0 1.1180E-03 1 1.3713E+00 5.2545E-03 2.8737E-01 2.6525E-02 4.8148E-03 1.9779E-03
2 2.5631E-01 1.0432E-01 4.3630E-04 1.4275E+00 1.8267E-01 7.6210E-02
-----
0.01  8910.00 1.0958E-03 1 1.3713E+00 5.2408E-03 2.8736E-01 2.6559E-02 4.7426E-03 1.9480E-03
2 2.5604E-01 1.0340E-01 4.3253E-04 1.4294E+00 1.8033E-01 7.5214E-02
-----
0.01  14850.0 1.0516E-03 1 1.3714E+00 5.2151E-03 2.8732E-01 2.6626E-02 4.5967E-03 1.9193E-03
2 2.5546E-01 1.0144E-01 4.2451E-04 1.4334E+00 1.7558E-01 7.4372E-02
-----
0.01  29700.0 9.4779E-04 1 1.3714E+00 5.1718E-03 2.8725E-01 2.6779E-02 4.2491E-03 1.8624E-03
2 2.5404E-01 9.6566E-02 4.0448E-04 1.4434E+00 1.6395E-01 7.2771E-02
-----
0.01  44550.0 8.4651E-04 1 1.3715E+00 5.1407E-03 2.8718E-01 2.6936E-02 3.9015E-03 1.7177E-03
2 2.5257E-01 9.1372E-02 3.8305E-04 1.4539E+00 1.5179E-01 6.7768E-02
-----
0.01  59400.0 7.4735E-04 1 1.3714E+00 5.1168E-03 2.8713E-01 2.7106E-02 3.5534E-03 1.5737E-03
2 2.5103E-01 8.5877E-02 3.6027E-04 1.4651E+00 1.3905E-01 6.2576E-02
-----
0.01  74250.0 6.5113E-04 1 1.3714E+00 5.0898E-03 2.8707E-01 2.7303E-02 3.2027E-03 1.4301E-03
2 2.4943E-01 8.0161E-02 3.3645E-04 1.4767E+00 1.2587E-01 5.7166E-02
-----
0.01  89100.0 5.5745E-04 1 1.3712E+00 5.0612E-03 2.8700E-01 2.7534E-02 2.8500E-03 1.2857E-03
2 2.4773E-01 7.4209E-02 3.1146E-04 1.4890E+00 1.1223E-01 5.1608E-02
-----
0.01  103950.0 4.6688E-04 1 1.3710E+00 5.0336E-03 2.8693E-01 2.7804E-02 2.5027E-03 1.1407E-03
2 2.4594E-01 6.8073E-02 2.8549E-04 1.5018E+00 9.8253E-02 4.5879E-02
-----
0.01  133650.0 3.0877E-04 1 1.3705E+00 4.9781E-03 2.8678E-01 2.8460E-02 1.8778E-03 1.0051E-03

```

2 2.4237E-01 5.6451E-02 2.3552E-04 1.5267E+00 7.1983E-02 4.0438E-02

ID= CCN

P = 0.10

POT	IRRAD	U-235	GRUPO	DIFUSION	SIGA	SCATTERING (i --> j)	NUSIGF	SIGF
(Mw)	(MwD/T)	(g/cm3)		(cm)	(cm-1)	(cm-1)	(n*cm-1)	(cm-1)
0.10	0.0	1.1622E-03	1	1.3714E+00	5.2777E-03	2.8740E-01 2.6417E-02	4.9534E-03	2.0043E-03
			2	2.5678E-01	1.0534E-01	4.4121E-04 1.4247E+00	1.8747E-01	7.7133E-02
0.10	2970.0	1.1402E-03	1	1.3713E+00	5.2717E-03	2.8739E-01 2.6493E-02	4.8869E-03	2.0078E-03
			2	2.5663E-01	1.0528E-01	4.4074E-04 1.4253E+00	1.8489E-01	7.7189E-02
0.10	5940.0	1.1182E-03	1	1.3713E+00	5.2593E-03	2.8737E-01 2.6531E-02	4.8161E-03	1.9783E-03
			2	2.5637E-01	1.0449E-01	4.3745E-04 1.4270E+00	1.8258E-01	7.6164E-02
0.10	8910.00	1.0963E-03	1	1.3714E+00	5.2463E-03	2.8734E-01 2.6565E-02	4.7447E-03	1.9485E-03
			2	2.5610E-01	1.0358E-01	4.3374E-04 1.4289E+00	1.8028E-01	7.5176E-02
0.10	14850.0	1.0532E-03	1	1.3715E+00	5.2222E-03	2.8730E-01 2.6630E-02	4.6026E-03	1.9201E-03
			2	2.5554E-01	1.0169E-01	4.2600E-04 1.4328E+00	1.7568E-01	7.4340E-02
0.10	29700.0	9.4939E-04	1	1.3716E+00	5.1759E-03	2.8720E-01 2.6782E-02	4.2551E-03	1.8648E-03
			2	2.5413E-01	9.6828E-02	4.0597E-04 1.4427E+00	1.6411E-01	7.2811E-02
0.10	44550.0	8.4803E-04	1	1.3718E+00	5.1420E-03	2.8711E-01 2.6940E-02	3.9081E-03	1.7202E-03
			2	2.5267E-01	9.1658E-02	3.8461E-04 1.4532E+00	1.5201E-01	6.7826E-02
0.10	59400.00	7.4913E-04	1	1.3719E+00	5.1162E-03	2.8702E-01 2.7109E-02	3.5628E-03	1.5763E-03
			2	2.5115E-01	8.6227E-02	3.6206E-04 1.4642E+00	1.3941E-01	6.2650E-02
0.10	74250.0	6.5283E-04	1	1.3720E+00	5.0871E-03	2.8694E-01 2.7304E-02	3.2143E-03	1.4336E-03
			2	2.4956E-01	8.0563E-02	3.3842E-04 1.4757E+00	1.2636E-01	5.7296E-02
0.10	89100.0	5.5933E-04	1	1.3720E+00	5.0558E-03	2.8684E-01 2.7531E-02	2.8649E-03	1.2899E-03
			2	2.4790E-01	7.4690E-02	3.1374E-04 1.4878E+00	1.1292E-01	5.1778E-02
0.10	103950.0	4.6896E-04	1	1.3720E+00	5.0257E-03	2.8673E-01 2.7796E-02	2.5210E-03	1.1461E-03
			2	2.4614E-01	6.8639E-02	2.8811E-04 1.5003E+00	9.9140E-02	4.6115E-02
0.10	133650.0	3.1145E-04	1	1.3718E+00	4.9653E-03	2.8651E-01 2.8431E-02	1.9039E-03	1.0114E-03
			2	2.4264E-01	5.7187E-02	2.3887E-04 1.5248E+00	7.3334E-02	4.0743E-02

ID= CCN

P = 0.50

POT	IRRAD	U-235	GRUPO	DIFUSION	SIGA	SCATTERING (i --> j)	NUSIGF	SIGF
(Mw)	(MwD/T)	(g/cm3)		(cm)	(cm-1)	(cm-1)	(n*cm-1)	(cm-1)


```

-----
0.50  0.0  1.1622E-03  1  1.3714E+00  5.2788E-03  2.8740E-01  2.6417E-02  4.9534E-03  2.0043E-03
                                2  2.5685E-01  1.0527E-01  4.4284E-04  1.4241E+00  1.8733E-01  7.7076E-02
-----
0.50  2970.0  1.1402E-03  1  1.3712E+00  5.2779E-03  2.8739E-01  2.6525E-02  4.8905E-03  2.0093E-03
                                2  2.5682E-01  1.0581E-01  4.4470E-04  1.4238E+00  1.8448E-01  7.7050E-02
-----
0.50  5940.0  1.1182E-03  1  1.3712E+00  5.2676E-03  2.8737E-01  2.6563E-02  4.8197E-03  1.9798E-03
                                2  2.5656E-01  1.0502E-01  4.4142E-04  1.4255E+00  1.8217E-01  7.5993E-02
-----
0.50  8910.0  1.0963E-03  1  1.3713E+00  5.2571E-03  2.8735E-01  2.6595E-02  4.7482E-03  1.9500E-03
                                2  2.5629E-01  1.0413E-01  4.3773E-04  1.4273E+00  1.7989E-01  7.5007E-02
-----
0.50  14850.0  1.0531E-03  1  1.3713E+00  5.2374E-03  2.8731E-01  2.6658E-02  4.6059E-03  1.9215E-03
                                2  2.5574E-01  1.0225E-01  4.3000E-04  1.4312E+00  1.7530E-01  7.4173E-02
-----
0.50  29700.0  9.4937E-04  1  1.3715E+00  5.1979E-03  2.8722E-01  2.6807E-02  4.2586E-03  1.8661E-03
                                2  2.5433E-01  9.7405E-02  4.0995E-04  1.4410E+00  1.6378E-01  7.2647E-02
-----
0.50  44550.0  8.4803E-04  1  1.3717E+00  5.1670E-03  2.8712E-01  2.6963E-02  3.9128E-03  1.7216E-03
                                2  2.5288E-01  9.2275E-02  3.8865E-04  1.4514E+00  1.5176E-01  6.7680E-02
-----
0.50  59400.0  7.4920E-04  1  1.3718E+00  5.1429E-03  2.8704E-01  2.7132E-02  3.5697E-03  1.5781E-03
                                2  2.5138E-01  8.6896E-02  3.6622E-04  1.4623E+00  1.3930E-01  6.2534E-02
-----
0.50  74250.0  6.5301E-04  1  1.3719E+00  5.1150E-03  2.8694E-01  2.7325E-02  3.2245E-03  1.4361E-03
                                2  2.4981E-01  8.1300E-02  3.4275E-04  1.4737E+00  1.2643E-01  5.7224E-02
-----
0.50  89100.0  5.5973E-04  1  1.3719E+00  5.0859E-03  2.8685E-01  2.7548E-02  2.8796E-03  1.2935E-03
                                2  2.4817E-01  7.5513E-02  3.1833E-04  1.4855E+00  1.1320E-01  5.1768E-02
-----
0.50  103950.0  4.6968E-04  1  1.3719E+00  5.0580E-03  2.8674E-01  2.7807E-02  2.5410E-03  1.1512E-03
                                2  2.4645E-01  6.9561E-02  2.9301E-04  1.4979E+00  9.9698E-02  4.6185E-02
-----
0.50  133650.0  3.1290E-04  1  1.3718E+00  5.0003E-03  2.8652E-01  2.8416E-02  1.9347E-03  1.0181E-03
                                2  2.4303E-01  5.8271E-02  2.4433E-04  1.5218E+00  7.4474E-02  4.0905E-02
-----

```

ID= CCN

P = 1.0

```

-----
POT   IRRAD   U-235   GRUPO   DIFUSION   SIGA   SCATTERING (i --> j )   NUSIGF   SIGF
(Mw)  (MwD/T) (g/cm3)                (cm)    (cm-1)    (cm-1)                (n*cm-1)  (cm-1)
-----
1.00  0.0  1.1622E-03   1  1.3734E+00  5.2781E-03  2.8695E-01  2.6358E-02  4.9527E-03  2.0041E-03
                                2  2.5747E-01  1.0512E-01  4.4477E-04  1.4203E+00  1.8710E-01  7.6981E-02
-----
1.00  2970.0  1.1402E-03   1  1.3731E+00  5.2808E-03  2.8694E-01  2.6496E-02  4.8931E-03  2.0104E-03
                                2  2.5756E-01  1.0621E-01  4.4875E-04  1.4191E+00  1.8400E-01  7.6880E-02
-----
1.00  5940.0  1.1182E-03   1  1.3731E+00  5.2709E-03  2.8692E-01  2.6534E-02  4.8223E-03  1.9809E-03
                                2  2.5730E-01  1.0543E-01  4.4548E-04  1.4207E+00  1.8171E-01  7.5796E-02
-----

```

```

1.00 8910.0 1.0963E-03 1 1.3731E+00 5.2612E-03 2.8690E-01 2.6566E-02 4.7509E-03 1.9511E-03
2 2.5703E-01 1.0454E-01 4.4179E-04 1.4226E+00 1.7943E-01 7.4815E-02
-----
1.00 14850.0 1.0531E-03 1 1.3732E+00 5.2435E-03 2.8686E-01 2.6628E-02 4.6086E-03 1.9226E-03
2 2.5648E-01 1.0267E-01 4.3406E-04 1.4264E+00 1.7486E-01 7.3984E-02
-----
1.00 29700.0 9.4936E-04 1 1.3734E+00 5.2094E-03 2.8677E-01 2.6774E-02 4.2612E-03 1.8672E-03
2 2.5507E-01 9.7845E-02 4.1396E-04 1.4362E+00 1.6340E-01 7.2463E-02
-----
1.00 44550.0 8.4803E-04 1 1.3736E+00 5.1833E-03 2.8668E-01 2.6929E-02 3.9157E-03 1.7227E-03
2 2.5363E-01 9.2740E-02 3.9264E-04 1.4465E+00 1.5144E-01 6.7516E-02
-----
1.00 59400.0 7.4923E-04 1 1.3737E+00 5.1626E-03 2.8659E-01 2.7095E-02 3.5731E-03 1.5792E-03
2 2.5213E-01 8.7382E-02 3.7016E-04 1.4573E+00 1.3904E-01 6.2391E-02
-----
1.00 74250.0 6.5310E-04 1 1.3738E+00 5.1371E-03 2.8650E-01 2.7286E-02 3.2288E-03 1.4374E-03
2 2.5057E-01 8.1804E-02 3.4663E-04 1.4686E+00 1.2625E-01 5.7108E-02
-----
1.00 89100.0 5.5990E-04 1 1.3738E+00 5.1094E-03 2.8640E-01 2.7507E-02 2.8851E-03 1.2950E-03
2 2.4893E-01 7.6031E-02 3.2213E-04 1.4804E+00 1.1313E-01 5.1683E-02
-----
1.00 103950.0 4.6996E-04 1 1.3738E+00 5.0821E-03 2.8630E-01 2.7762E-02 2.5478E-03 1.1531E-03
2 2.4722E-01 7.0093E-02 2.9674E-04 1.4926E+00 9.9731E-02 4.6138E-02
-----
1.00 133650.0 3.1344E-04 1 1.3738E+00 5.0246E-03 2.8607E-01 2.8361E-02 1.9444E-03 1.0204E-03
2 2.4381E-01 5.8808E-02 2.4785E-04 1.5165E+00 7.4728E-02 4.0898E-02
-----

```

ID= CCN

P = 5.0

```

-----
POT   IRRAD   U-235   GRUPO   DIFUSION   SIGA   SCATTERING (i --> j )   NUSIGF   SIGF
(Mw)  (MwD/T)  (g/cm3)                (cm)      (cm-1)      (cm-1)                (n*cm-1)   (cm-1)
-----
5.00  0.0  1.1622E-03  1  1.3754E+00  5.2874E-03  2.8650E-01  2.6300E-02  4.9521E-03  2.0038E-03
2  2.5869E-01  1.0431E-01  4.6101E-04  1.4117E+00  1.8567E-01  7.6393E-02
-----
5.00  2970.0  1.1402E-03  1  1.3748E+00  5.3029E-03  2.8651E-01  2.6527E-02  4.9023E-03  2.0142E-03
2  2.5910E-01  1.0707E-01  4.7194E-04  1.4078E+00  1.8186E-01  7.6071E-02
-----
5.00  5940.0  1.1182E-03  1  1.3748E+00  5.2924E-03  2.8649E-01  2.6564E-02  4.8315E-03  1.9846E-03
2  2.5885E-01  1.0630E-01  4.6856E-04  1.4094E+00  1.7961E-01  7.4910E-02
-----
5.00  8910.0  1.0963E-03  1  1.3748E+00  5.2827E-03  2.8647E-01  2.6597E-02  4.7601E-03  1.9549E-03
2  2.5858E-01  1.0542E-01  4.6473E-04  1.4112E+00  1.7737E-01  7.3945E-02
-----
5.00  14850.0  1.0531E-03  1  1.3749E+00  5.2667E-03  2.8642E-01  2.6658E-02  4.6177E-03  1.9263E-03
2  2.5804E-01  1.0356E-01  4.5669E-04  1.4149E+00  1.7289E-01  7.3127E-02
-----
5.00  29700.0  9.4929E-04  1  1.3751E+00  5.2415E-03  2.8634E-01  2.6800E-02  4.2702E-03  1.8708E-03
2  2.5666E-01  9.8769E-02  4.3586E-04  1.4245E+00  1.6161E-01  7.1624E-02
-----

```

```

5.00 44550.0 8.4800E-04 1 1.3753E+00 5.2263E-03 2.8624E-01 2.6946E-02 3.9245E-03 1.7261E-03
                        2 2.5525E-01 9.3684E-02 4.1366E-04 1.4345E+00 1.4985E-01 6.6753E-02
-----
5.00 59400.0 7.4927E-04 1 1.3754E+00 5.2162E-03 2.8616E-01 2.7105E-02 3.5821E-03 1.5825E-03
                        2 2.5378E-01 8.8333E-02 3.9022E-04 1.4451E+00 1.3766E-01 6.1708E-02
-----
5.00 74250.0 6.5326E-04 1 1.3755E+00 5.2001E-03 2.8607E-01 2.7287E-02 3.2386E-03 1.4407E-03
                        2 2.5226E-01 8.2752E-02 3.6564E-04 1.4561E+00 1.2510E-01 5.6509E-02
-----
5.00 89100.0 5.6023E-04 1 1.3756E+00 5.1803E-03 2.8598E-01 2.7498E-02 2.8959E-03 1.2985E-03
                        2 2.5067E-01 7.6968E-02 3.4002E-04 1.4676E+00 1.1222E-01 5.1176E-02
-----
5.00 103950.0 4.7053E-04 1 1.3757E+00 5.1591E-03 2.8587E-01 2.7742E-02 2.5601E-03 1.1569E-03
                        2 2.4900E-01 7.1009E-02 3.1345E-04 1.4796E+00 9.9080E-02 4.5729E-02
-----
5.00 133650.0 3.1445E-04 1 1.3756E+00 5.1089E-03 2.8564E-01 2.8320E-02 1.9598E-03 1.0246E-03
                        2 2.4568E-01 5.9720E-02 2.6242E-04 1.5028E+00 7.4564E-02 4.0579E-02
-----

```

ID= CCN
P = 10.0

```

-----
POT   IRRAD   U-235   GRUPO   DIFUSION   SIGA   SCATTERING (i --> j )   NUSIGF   SIGF
(Mw)  (MwD/T)  (g/cm3)                (cm)      (cm-1)      (cm-1)                (n*cm-1)  (cm-1)
-----
10.0  0.0    1.1622E-03  1 1.3792E+00 5.2971E-03 2.8565E-01 2.6189E-02 4.9509E-03 2.0033E-03
                        2 2.6055E-01 1.0329E-01 4.8103E-04 1.3991E+00 1.8390E-01 7.5666E-02
-----
10.0  2970.0 1.1402E-03 1 1.3785E+00 5.3186E-03 2.8566E-01 2.6444E-02 4.9044E-03 2.0151E-03
                        2 2.6106E-01 1.0662E-01 4.9492E-04 1.3945E+00 1.7991E-01 7.5277E-02
-----
10.0  5940.0 1.1182E-03 1 1.3785E+00 5.3081E-03 2.8564E-01 2.6482E-02 4.8338E-03 1.9855E-03
                        2 2.6082E-01 1.0586E-01 4.9141E-04 1.3960E+00 1.7769E-01 7.4101E-02
-----
10.0  8910.0 1.0963E-03 1 1.3785E+00 5.2983E-03 2.8562E-01 2.6514E-02 4.7623E-03 1.9557E-03
                        2 2.6055E-01 1.0498E-01 4.8738E-04 1.3978E+00 1.7549E-01 7.3150E-02
-----
10.0  14850.0 1.0531E-03 1 1.3786E+00 5.2822E-03 2.8557E-01 2.6575E-02 4.6201E-03 1.9272E-03
                        2 2.6002E-01 1.0314E-01 4.7900E-04 1.4014E+00 1.7106E-01 7.2339E-02
-----
10.0  29700.0 9.4926E-04 1 1.3788E+00 5.2583E-03 2.8548E-01 2.6715E-02 4.2727E-03 1.8717E-03
                        2 2.5868E-01 9.8383E-02 4.5721E-04 1.4107E+00 1.5993E-01 7.0848E-02
-----
10.0  44550.0 8.4797E-04 1 1.3790E+00 5.2464E-03 2.8539E-01 2.6858E-02 3.9271E-03 1.7270E-03
                        2 2.5730E-01 9.3320E-02 4.3394E-04 1.4204E+00 1.4832E-01 6.6037E-02
-----
10.0  59400.0 7.4929E-04 1 1.3792E+00 5.2403E-03 2.8531E-01 2.7012E-02 3.5850E-03 1.5834E-03
                        2 2.5587E-01 8.7993E-02 4.0936E-04 1.4307E+00 1.3629E-01 6.1053E-02
-----
10.0  74250.0 6.5336E-04 1 1.3793E+00 5.2287E-03 2.8522E-01 2.7189E-02 3.2419E-03 1.4416E-03
                        2 2.5439E-01 8.2438E-02 3.8359E-04 1.4413E+00 1.2388E-01 5.5917E-02
-----

```

```

10.0 89100.0 5.6043E-04 1 1.3794E+00 5.2131E-03 2.8512E-01 2.7395E-02 2.8997E-03 1.2997E-03
      2 2.5284E-01 7.6681E-02 3.5674E-04 1.4525E+00 1.1117E-01 5.0649E-02
-----
10.0 103950.0 4.7084E-04 1 1.3794E+00 5.1958E-03 2.8502E-01 2.7633E-02 2.5644E-03 1.1582E-03
      2 2.5123E-01 7.0753E-02 3.2890E-04 1.4641E+00 9.8195E-02 4.5270E-02
-----
10.0 133650.0 3.1497E-04 1 1.3794E+00 5.1514E-03 2.8479E-01 2.8201E-02 1.9653E-03 1.0260E-03
      2 2.4803E-01 5.9555E-02 2.7557E-04 1.4865E+00 7.3998E-02 4.0175E-02
-----

```

ID= CCN
P = 12.0

POT	IRRAD	U-235	GRUPO	DIFUSION	SIGA	SCATTERING (i --> j)	NUSIGF	SIGF
(Mw)	(MwD/T)	(g/cm3)		(cm)	(cm-1)	(cm-1)	(n*cm-1)	(cm-1)
12.0	0.0	1.1622E-03	1	1.3814E+00	5.3001E-03	2.8515E-01 2.6124E-02	4.9502E-03	2.0030E-03
			2	2.6148E-01	1.0288E-01	4.8898E-04 1.3931E+00	1.8319E-01	7.5372E-02
12.0	2969.8	1.1402E-03	1	1.3806E+00	5.3232E-03	2.8516E-01 2.6385E-02	4.9044E-03	2.0151E-03
			2	2.6201E-01	1.0632E-01	5.0365E-04 1.3883E+00	1.7917E-01	7.4972E-02
12.0	5939.8	1.1182E-03	1	1.3807E+00	5.3128E-03	2.8514E-01 2.6423E-02	4.8338E-03	1.9855E-03
			2	2.6177E-01	1.0557E-01	5.0009E-04 1.3899E+00	1.7696E-01	7.3795E-02
12.0	8909.6	1.0963E-03	1	1.3807E+00	5.3030E-03	2.8512E-01 2.6455E-02	4.7624E-03	1.9557E-03
			2	2.6151E-01	1.0469E-01	4.9600E-04 1.3916E+00	1.7477E-01	7.2849E-02
12.0	14849.8	1.0531E-03	1	1.3808E+00	5.2870E-03	2.8508E-01 2.6515E-02	4.6202E-03	1.9273E-03
			2	2.6098E-01	1.0286E-01	4.8747E-04 1.3952E+00	1.7037E-01	7.2042E-02
12.0	29699.8	9.4924E-04	1	1.3810E+00	5.2634E-03	2.8499E-01 2.6656E-02	4.2730E-03	1.8717E-03
			2	2.5965E-01	9.8117E-02	4.6534E-04 1.4043E+00	1.5930E-01	7.0554E-02
12.0	44550.0	8.4797E-04	1	1.3812E+00	5.2522E-03	2.8490E-01 2.6798E-02	3.9275E-03	1.7270E-03
			2	2.5828E-01	9.3066E-02	4.4165E-04 1.4140E+00	1.4774E-01	6.5765E-02
12.0	59400.1	7.4930E-04	1	1.3814E+00	5.2471E-03	2.8481E-01 2.6950E-02	3.5855E-03	1.5835E-03
			2	2.5687E-01	8.7754E-02	4.1663E-04 1.4241E+00	1.3576E-01	6.0803E-02
12.0	74250.2	6.5339E-04	1	1.3815E+00	5.2367E-03	2.8472E-01 2.7126E-02	3.2427E-03	1.4418E-03
			2	2.5540E-01	8.2215E-02	3.9042E-04 1.4346E+00	1.2342E-01	5.5690E-02
12.0	89100.4	5.6049E-04	1	1.3816E+00	5.2222E-03	2.8463E-01 2.7330E-02	2.9006E-03	1.2999E-03
			2	2.5388E-01	7.6476E-02	3.6310E-04 1.4456E+00	1.1076E-01	5.0446E-02
12.0	103950.5	4.7095E-04	1	1.3816E+00	5.2061E-03	2.8453E-01 2.7567E-02	2.5656E-03	1.1585E-03
			2	2.5228E-01	7.0566E-02	3.3477E-04 1.4570E+00	9.7846E-02	4.5092E-02
12.0	133650.	3.1516E-04	1	1.3816E+00	5.1634E-03	2.8430E-01 2.8131E-02	1.9669E-03	1.0264E-03
			2	2.4913E-01	5.9415E-02	2.8057E-04 1.4791E+00	7.3768E-02	4.0017E-02

** Secciones eficaces para las zonas consideradas homogéneas (Temperatura = 24 C) **

** Caja del elemento de control fino (barra afuera) **

ID= CCF

GRUPO	DIFUSION (cm)	SIGA (cm-1)	SCATTERING (i --> j) (cm-1)	
1	1.4570E+00	1.6045E-04	2.5202E-01	4.1691E-03
2	6.9388E-01	4.9539E-03	1.6135E-04	4.9482E-01

** Caja del elemento de Irradiación **

ID= CIR

GRUPO	DIFUSION (cm)	SIGA (cm-1)	SCATTERING (i --> j) (cm-1)	
1	1.3882E+00	4.3742E-04	2.8020E-01	3.1844E-02
2	2.2639E-01	1.6261E-02	3.0740E-05	1.6563E+00

** Caja del elemento de Grafito **

ID= CGR

GRUPO	DIFUSION (cm)	SIGA (cm-1)	SCATTERING (i --> j) (cm-1)	
1	1.4517E+00	7.9801E-05	2.6024E-01	1.9556E-03
2	7.8428E-01	2.3468E-03	2.4600E-04	4.2842E-01

** Caja del elemento de Berilio **

ID= CBE

GRUPO	DIFUSION (cm)	SIGA (cm-1)	SCATTERING (i --> j) (cm-1)	
-------	------------------	----------------	---------------------------------	--

1	8.1099E-01	-1.6858E-03	4.7818E-01	7.6236E-03
2	4.4045E-01	2.7035E-03	4.8708E-05	7.6419E-01

** Caja del elemento de Agua **

ID= CAG

GRUPO	DIFUSION (cm)	SIGA (cm-1)	SCATTERING (i --> j) (cm-1)
-------	------------------	----------------	---------------------------------

1	1.2235E+00	4.8706E-04	3.5132E-01 4.6778E-02
2	1.5402E-01	1.8803E-02	7.9915E-05 2.4176E+00

**** Barra de control extraída ****

ID= BEX

GRUPO	DIFUSION (cm)	SIGA (cm-1)	SCATTERING (i --> j) (cm-1)
-------	------------------	----------------	---------------------------------

1	1.3340E+00	4.8862E-04	2.9879E-01 3.5083E-02
2	2.0087E-01	1.7202E-02	7.8816E-05 1.8550E+00

**** Barra de control extraída (ESC) ****

ID= BES

GRUPO	DIFUSION (cm)	SIGA (cm-1)	SCATTERING (i --> j) (cm-1)
-------	------------------	----------------	---------------------------------

1	1.3340E+00	4.8862E-04	2.9879E-01 3.5083E-02
2	2.0087E-01	1.7202E-02	7.8816E-05 1.8550E+00

**** Barra de control introducida ****

ID= BIN

GRUPO	DIFUSION (cm)	SIGA (cm-1)	SCATTERING (i --> j) (cm-1)
-------	------------------	----------------	---------------------------------

1	1.3490E+00	1.7782E-02	2.9174E-01 5.6254E-03
2	2.6874E-01	5.4008E-01	1.9815E-03 8.4895E-01

ID= HLM

GRUPO	DIFUSION (cm)	SIGA (cm-1)	SCATTERING (i --> j) (cm-1)
1	1.5010E+00	4.6977E-04	2.4293E-01 2.2213E-02
2	2.9768E-01	1.5310E-02	8.2760E-05 1.2491E+00

** Datos del Marco de Aluminio **

ID= ALM

GRUPO	DIFUSION (cm)	SIGA (cm-1)	SCATTERING (i --> j) (cm-1)
1	2.0416E+00	3.8549E-04	1.7282E-01 3.4294E-03
2	8.6127E-01	1.2084E-02	1.3403E-04 4.2036E-01

ID= EFI

Espectro de fisión

G	X(G)
1	0.999972
2	0.000028

***** C A S E - 104 *****

WimCit : 30-Octubre-2002

APENDICE B

Sección 003 y 004

	10 pts 20 cm	3pts 5cm	5pts 8cm	4pts 6cm
2pts 3cm	Region1	Region2	Region3	Region4
1pt 2cm	Region5			
25pts 15 cm.	Zona1		Zona3	
2 Pts. 1 cm.				
10 Pts. 12 cm.		Zona2		Region1

Fíg. B-1. Ejemplo de subdivisión por mallas.

En la figura B-1 vemos un modelo geométrico simple en 2 dimensiones para un reactor tipo “Slab”. Dividimos al reactor en 3 zonas de diferente material.

Trazamos líneas horizontales y verticales en las interfaces entre zonas (líneas punteadas).

En esta sección especificamos el número de divisiones y el ancho de cada región vertical de izquierda a derecha seguido por el número de divisiones y anchos de cada región desde la parte superior hasta la parte inferior.

Ejemplo: 004

10	20.0	3	5.0	5	8.0	4	6.0				
2	3.0	1	2.0	24	15.0	2	1.0	10	12.0		

Sección 005

El número de zona el cual contiene a cada región debe ser especificada para cada región. Por ejemplo:

2	2	2	2
2	2	3	2
1	2	3	2
2	2	3	2
2	2	2	2

APENDICE C

INTERPOLACIÓN DE NEWTON DE 2° ORDEN:

Supongamos que ejecutamos el caso del núcleo N14 (Archivo N14.CNF).

Tomemos el valor de la potencia de operación del reactor a 7MW durante 10 días. Estas son nuestras condiciones de operación y Ud. puede configurarla así en el programa.

Ahora queremos hallar el valor de sus coeficientes de absorción, difusión, dispersión y el valor de su Irradiación (quemado) para esta potencia.

Si vemos en la librería de datos nucleares (bar_2g.lib o simplemente 2g.lib) estos valores están tabulados solamente para valores específicos de potencia y por consiguiente de quemado. Estos valores representan un archivo de salida del código Wims que es uno de los dos códigos con el cual trabajamos.

Seleccionamos un elemento cualquiera de nuestra configuración nuclear. Digamos el elemento combustible NN-006. Estos elementos combustibles tienen definida su masa al inicio de operación con el núcleo fresco, es decir tenemos para:

NN (elementos combustibles normales) = 1417.72E-06 Tn. [U235]

NC (elementos combustibles de control) = 1063.2911E-06 Tn. [U235]

Ahora hallaremos el valor de la constante de fisión para el U_{235} para una potencia de 7MWD.

Si vemos la posición del elemento NN-006 lo ubicamos en la 2da. fila y 5ta. columna del núcleo del reactor (posición E2 para los operadores), pero para el programa este elemento lo ubica en la zona 15 si leemos de izquierda a derecha la configuración nuclear (N14.cnf).

Luego calculamos la Irradiación por tonelada métrica (pues la librería de datos nucleares está en estas unidades) de este elemento obtenemos:

Irrad_{NN-006}(MWD / Tn.) =

$$\begin{aligned}\text{Quem}_{\text{NN-006}}(\text{MWD} / \text{Tn.}) &= (7.0\text{MW} * 10.0 \text{ Días}) / 1417.72\text{E-}06 (\text{Tn.}) \\ &= 49375.0 \text{ MWD} / \text{Tn.}_{\text{U-235}}\end{aligned}$$

Interpolación a quemado: Como 7 MW está entre 5MW y 10 MW (valores tabulados de la librería de datos nucleares).

Interpolando a quemado (para potencia = 5MW)

El valor 49375.0 MWD está entre 44550.00 MWD y 59400.00MWD es decir: 44550.00 MWD < 49375.0 MWD < 59400.00 MWD. Entonces:

$$\text{Quem}_{51} (44550.00 \text{ MWD}) \Rightarrow \mu_{51} = 6.6753\text{E-}02 \text{ cm}^{-1} (\text{Fisión})$$

$$\text{Quem}_{52} (59400.00 \text{ MWD}) \Rightarrow \mu_{52} = 6.1708\text{E-}02 \text{ cm}^{-1} (\text{Fisión})$$

$$\text{Quem}_5 \Rightarrow \mu_5 = ? (\text{Fisión})$$

$$\mu_5 = \mu_{51} + [(\mu_{52} - \mu_{51}) / (\text{Quem}_{52} - \text{Quem}_{51})] * (\text{Quem}_7 - \text{Quem}_{51})$$

$\mu_5 = 6.51137\text{E-}02 \text{ n} * \text{cm}^{-1}$

Interpolando a quemado (para potencia = 10MW)

El valor 49375.0 MWD está entre 44550.00 MWD y 59400.00MWD es decir: 44550.00 MWD < 49375.0 MWD < 59400.00 MWD. Entonces:

$$\text{Quem}_{101}(44550.00 \text{ MWD}) \Rightarrow \mu_{101} = 6.6037\text{E-}02 \text{ cm}^{-1} \text{ (Fisión)}$$

$$\text{Quem}_{102}(59400.00 \text{ MWD}) \Rightarrow \mu_{102} = 6.1053\text{E-}02 \text{ cm}^{-1} \text{ (Fisión)}$$

$$\text{Quem}_{10} \Rightarrow \mu_{10} = ? \text{ (Fisión)}$$

$$\mu_{10} = \mu_{101} + [(\mu_{102} - \mu_{101})/(\text{Quem}_{102} - \text{Quem}_{101})]*(\text{Quem}_7 - \text{Quem}_{101})$$

$\mu_{10} = 6.44176\text{E-}02 \text{ n}^*\text{cm}^{-1}$

Finalmente hacemos nuestra interpolación a Potencia = 7 MWD

$$\mu_7 = \mu_5 + [(\mu_{10} - \mu_5) / (\text{Pot}_{10} - \text{Pot}_5)] * (\text{Pot}_7 - \text{Pot}_5)$$

$\mu_7 = 10.348582\text{E-}02 \text{ n}^*\text{cm}^{-1}$
--

Estos resultados son generados por la unidad U031.pas el cual nos dará un archivo de salida llamado Fort.31 en la cual se especifican los datos nucleares asociados para cada zona del núcleo del reactor entre ellos nuestro valor interpolado para μ_7 .

APENDICE D

MAPA DE FLUJOS A 2 GRUPOS ENERGÉTICOS DEL NÚCLEO N14

R P - 1 0 : N U C L E O N° 14

Potencia = 88.58E-06MW (0.00 MWD al 30-10-2002)

Mapa de flujo del grupo ® 1 ® (1.0E+09 n/cm².s) Keff = 1.08496

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	0.00522	0.02134	0.08994	0.27619	0.44682	0.56905	0.44684	0.27623	0.08997	0.02145
2	0.01055	0.04269	0.17423	0.57637	1.13071	1.33682	1.13078	0.57645	0.17431	0.04294
3	0.02018	0.08765	0.32086	0.86901	1.64133	1.85726	1.64147	0.86919	0.32108	0.08820
4	0.03126	0.16120	0.63448	1.44782	2.00061	1.87491	2.00083	1.44823	0.63494	0.16224
5	0.03162	0.16340	0.64624	1.48997	2.14110	2.34793	2.14132	1.49039	0.64671	0.16445
6	0.02096	0.09166	0.34061	0.94759	1.84037	2.13199	1.84052	0.94778	0.34083	0.09223
7	0.01130	0.04636	0.19235	0.64502	1.26799	1.47312	1.26807	0.64510	0.19244	0.04663
8	0.00573	0.02356	0.09942	0.30402	0.48421	0.59498	0.48424	0.30406	0.09946	0.02369
9	0.00250	0.00936	0.03202	0.07731	0.11510	0.13915	0.11510	0.07732	0.03204	0.00941
10	0.00089	0.00283	0.00751	0.01483	0.02160	0.02468	0.02160	0.01483	0.00752	0.00284

Mapa de flujo del grupo @ 2 @ (10E+09 n/cm².s)

Keff = 1.08496

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	0.01823	0.06957	0.22733	0.36976	0.47753	0.42188	0.47756	0.36983	0.22745	0.06995
2	0.03630	0.13494	0.39237	0.49104	0.36759	0.36406	0.36762	0.49114	0.39263	0.13570
3	0.06668	0.24426	0.60640	0.82145	0.52914	0.55518	0.52919	0.82167	0.60694	0.24573
4	0.09840	0.34828	0.48887	0.44606	0.63447	1.37205	0.63453	0.44623	0.48955	0.35055
5	0.09956	0.35321	0.49809	0.46203	0.61865	0.68313	0.61871	0.46221	0.49877	0.35552
6	0.06927	0.25569	0.64376	0.87958	0.53741	0.55350	0.53746	0.87981	0.64432	0.25723
7	0.03891	0.14633	0.42970	0.53347	0.39529	0.44221	0.39532	0.53358	0.42998	0.14715
8	0.02001	0.07684	0.25181	0.41071	0.54714	0.54378	0.54717	0.41079	0.25195	0.07726
9	0.00886	0.03193	0.10067	0.20888	0.28923	0.32858	0.28924	0.20891	0.10072	0.03210
10	0.00319	0.00996	0.02581	0.04947	0.07077	0.08013	0.07077	0.04948	0.02583	0.01001

Mapa de potencia (Kwatts):

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	0.00	0.00	0.00	-	-	-
3	-	-	-	-	0.00	0.00	0.00	-	-	-
4	-	-	-	0.00	0.01	-	0.01	0.00	-	-
5	-	-	-	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	-	-
6	-	-	-	-	0.00	0.01	0.00	-	-	-
7	-	-	-	-	0.00	0.00	0.00	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Potencia total = 8.86E-05 Mw.

Potencia máxima = 0.01 Kw. Posición: (F 5)

Potencia mínima = 0.00 Kw. Posición: (F 7)

Potencia promedio CCN = 0.00 Kw.

Potencia promedio CCC = 0.00 Kw.

 ***** C A S E - 104 *****

WimCit: Jueves, 31 de Octubre de 2002
 08:55:47 AM

APENDICE E

DATOS DE ENTRADA PARA EL CASO N14 A DOS DIMENSIONES

Entrada para el CITATION-RP10GC (modelo bidimensional a 2 grupos)																							
Núcleo RP-10/RP-0. Potencia = 1MW																							
001																							
0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
999999	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
.000000E+00				.000000E+00				.000000E+00				.000000E+00				.000000E+00				.000000E+00			
003																							
0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	
1E-04				1E-05				1E-04															
0.000000E+00-2.000000.0162600E-010.1000000E+010.1000000E+010.0000000E+00																							
4.570000E-024.180000E-01																							
004																							
4	15.4	1	0.5	4	6.7	1	0.5	1	0.5	4	6.7	1	0.5	1	0.5	4	6.7	1	0.5	1	0.5	4	
1	0.5	1	0.5	4	6.7	1	0.5	1	0.5	4	6.7	1	0.5	1	0.5	4	6.7	1	0.5	1	0.5	4	
1	0.5	1	0.5	4	6.7	1	0.5	1	0.5	4	6.7	1	0.5	1	0.5	4	6.7	1	0.5	1	0.5	4	
1	0.5	1	0.5	4	6.7	1	0.5	1	0.5	4	6.7	1	0.5	1	0.5	4	6.7	1	0.5	1	0.5	4	
1	0.5	1	0.5	4	6.7	1	0.5	1	0.5	4	6.7	1	0.5	1	0.5	4	6.7	1	0.5	1	0.5	4	
1	0.5	4	15.4	4	16.4	5	1.064	4	6.072	5	1.064	4	6.072	5	1.064	4	6.072	5	1.064	4	6.072	5	
4	16.4	5	1.064	4	6.072	5	1.064	4	6.072	5	1.064	4	6.072	5	1.064	4	6.072	5	1.064	4	6.072	5	
5	1.064	5	1.064	4	6.072	5	1.064	4	6.072	5	1.064	4	6.072	5	1.064	4	6.072	5	1.064	4	6.072	5	
5	1.064	5	1.064	4	6.072	5	1.064	4	6.072	5	1.064	4	6.072	5	1.064	4	6.072	5	1.064	4	6.072	5	
5	1.064	5	1.064	4	6.072	5	1.064	4	6.072	5	1.064	4	6.072	5	1.064	4	6.072	5	1.064	4	6.072	5	
5	1.064	4	16.4	4	16.4	5	1.064	4	6.072	5	1.064	4	6.072	5	1.064	4	6.072	5	1.064	4	6.072	5	
005																							
190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	
190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	
190	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6	7	7	7	8	
8	9	9	9	10	10	10	10	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190		
190	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6	7	7	7	8	
8	9	9	9	10	10	10	10	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190		
190	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6	7	7	7	8	
8	9	9	9	10	10																		

```

190 51 51 51 52 52 52 53 53 53 54 54 54151 55152153 56154155 57156 58 58
58 59 59 59 60 60 60190
190 61 61 61 62 62 62 63 63 63 64 64 64157 65158159105160161 67162 68 68
68 69 69 69 70 70 70190
190 61 61 61 62 62 62 63 63 63 64 64 64157 65158159 66160161 67162 68 68
68 69 69 69 70 70 70190
190 61 61 61 62 62 62 63 63 63 64 64 64157 65158159105160161 67162 68 68
68 69 69 69 70 70 70190
190 71 71 71 72 72 72 73 73 73 74 74 74 75 75 75 76 76 76 77 77 77 78 78
78 79 79 79 80 80 80190
190 71 71 71 72 72 72 73 73 73 74 74 74 75 75 75 76 76 76 77 77 77 78 78
78 79 79 79 80 80 80190
190 71 71 71 72 72 72 73 73 73 74 74 74 75 75 75 76 76 76 77 77 77 78 78
78 79 79 79 80 80 80190
190 81 81 81 82 82 82 83 83 83 84 84 84 85 85 85 86 86 86 87 87 87 88 88
88 89 89 89 90 90 90190
190 81 81 81 82 82 82 83 83 83 84 84 84 85 85 85 86 86 86 87 87 87 88 88
88 89 89 89 90 90 90190
190 81 81 81 82 82 82 83 83 83 84 84 84 85 85 85 86 86 86 87 87 87 88 88
88 89 89 89 90 90 90190
190 91 91 91 92 92 92 93 93 93 94 94 94 95 95 95 96 96 96 97 97 97 98 98
98 99 99 99100100100190
190 91 91 91 92 92 92 93 93 93 94 94 94 95 95 95 96 96 96 97 97 97 98 98
98 99 99 99100100100190
190 91 91 91 92 92 92 93 93 93 94 94 94 95 95 95 96 96 96 97 97 97 98 98
98 99 99 99100100100190
190190190190190190190190190190190190190190190190190190190190190190190
190190190190190190190190190
008
2 1 1
1 1 1.22350E+00 4.87060E-04 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
3.51320E-01 4.67780E-02
1 2 1.54020E-01 1.88030E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
7.99150E-05 2.41760E+00
2 1 1.22350E+00 4.87060E-04 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
3.51320E-01 4.67780E-02
2 2 1.54020E-01 1.88030E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
7.99150E-05 2.41760E+00
3 1 1.22350E+00 4.87060E-04 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
3.51320E-01 4.67780E-02
3 2 1.54020E-01 1.88030E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
7.99150E-05 2.41760E+00
4 1 1.45170E+00 7.98010E-05 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
2.60240E-01 1.95560E-03
4 2 7.84280E-01 2.34680E-03 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
2.46000E-04 4.28420E-01
5 1 1.38820E+00 4.37420E-04 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
2.80200E-01 3.18440E-02
5 2 2.26390E-01 1.62610E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
3.07400E-05 1.65630E+00
6 1 1.45170E+00 7.98010E-05 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
2.60240E-01 1.95560E-03
6 2 7.84280E-01 2.34680E-03 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
2.46000E-04 4.28420E-01
7 1 1.38820E+00 4.37420E-04 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
2.80200E-01 3.18440E-02
7 2 2.26390E-01 1.62610E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
3.07400E-05 1.65630E+00
8 1 1.45170E+00 7.98010E-05 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
2.60240E-01 1.95560E-03
8 2 7.84280E-01 2.34680E-03 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
2.46000E-04 4.28420E-01
9 1 1.22350E+00 4.87060E-04 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
3.51320E-01 4.67780E-02
9 2 1.54020E-01 1.88030E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
7.99150E-05 2.41760E+00
10 1 1.22350E+00 4.87060E-04 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
3.51320E-01 4.67780E-02
10 2 1.54020E-01 1.88030E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
7.99150E-05 2.41760E+00

```

11	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01		4.67780E-02				
11	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05		2.41760E+00				
12	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01		4.67780E-02				
12	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05		2.41760E+00				
13	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01		4.67780E-02				
13	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05		2.41760E+00				
14	1	1.45170E+00	7.98010E-05	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.60240E-01		1.95560E-03				
14	2	7.84280E-01	2.34680E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.46000E-04		4.28420E-01				
15	1	1.37140E+00	5.27740E-03	4.95340E-03	0.00000E+00	6.35363E-14
2.87400E-01		2.64170E-02				
15	2	2.56760E-01	1.05370E-01	1.87510E-01	0.00000E+00	2.44562E-12
4.40750E-04		1.42480E+00				
16	1	1.37140E+00	5.27740E-03	4.95340E-03	0.00000E+00	6.35363E-14
2.87400E-01		2.64170E-02				
16	2	2.56760E-01	1.05370E-01	1.87510E-01	0.00000E+00	2.44562E-12
4.40750E-04		1.42480E+00				
17	1	1.37140E+00	5.27740E-03	4.95340E-03	0.00000E+00	6.35363E-14
2.87400E-01		2.64170E-02				
17	2	2.56760E-01	1.05370E-01	1.87510E-01	0.00000E+00	2.44562E-12
4.40750E-04		1.42480E+00				
18	1	1.45170E+00	7.98010E-05	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.60240E-01		1.95560E-03				
18	2	7.84280E-01	2.34680E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.46000E-04		4.28420E-01				
19	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01		4.67780E-02				
19	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05		2.41760E+00				
20	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01		4.67780E-02				
20	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05		2.41760E+00				
21	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01		4.67780E-02				
21	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05		2.41760E+00				
22	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01		4.67780E-02				
22	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05		2.41760E+00				
23	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01		4.67780E-02				
23	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05		2.41760E+00				
24	1	1.38820E+00	4.37420E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.80200E-01		3.18440E-02				
24	2	2.26390E-01	1.62610E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.07400E-05		1.65630E+00				
25	1	1.37140E+00	5.27740E-03	4.95340E-03	0.00000E+00	6.35363E-14
2.87400E-01		2.64170E-02				
25	2	2.56760E-01	1.05370E-01	1.87510E-01	0.00000E+00	2.44562E-12
4.40750E-04		1.42480E+00				
26	1	1.37140E+00	5.27740E-03	4.95340E-03	0.00000E+00	6.35363E-14
2.87400E-01		2.64170E-02				
26	2	2.56760E-01	1.05370E-01	1.87510E-01	0.00000E+00	2.44562E-12
4.40750E-04		1.42480E+00				
27	1	1.37140E+00	5.27740E-03	4.95340E-03	0.00000E+00	6.35363E-14
2.87400E-01		2.64170E-02				
27	2	2.56760E-01	1.05370E-01	1.87510E-01	0.00000E+00	2.44562E-12
4.40750E-04		1.42480E+00				
28	1	1.38820E+00	4.37420E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.80200E-01		3.18440E-02				

28	2	2.26390E-01	1.62610E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.07400E-05		1.65630E+00				
29	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01		4.67780E-02				
29	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05		2.41760E+00				
30	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01		4.67780E-02				
30	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05		2.41760E+00				
31	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01		4.67780E-02				
31	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05		2.41760E+00				
32	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01		4.67780E-02				
32	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05		2.41760E+00				
33	1	1.45170E+00	7.98010E-05	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.60240E-01		1.95560E-03				
33	2	7.84280E-01	2.34680E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.46000E-04		4.28420E-01				
34	1	1.37140E+00	5.27740E-03	4.95340E-03	0.00000E+00	6.35363E-14
2.87400E-01		2.64170E-02				
34	2	2.56760E-01	1.05370E-01	1.87510E-01	0.00000E+00	2.44562E-12
4.40750E-04		1.42480E+00				
35	1	1.37140E+00	5.27740E-03	4.95340E-03	0.00000E+00	6.35363E-14
2.87400E-01		2.64170E-02				
35	2	2.56760E-01	1.05370E-01	1.87510E-01	0.00000E+00	2.44562E-12
4.40750E-04		1.42480E+00				
36	1	1.38820E+00	4.37420E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.80200E-01		3.18440E-02				
36	2	2.26390E-01	1.62610E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.07400E-05		1.65630E+00				
37	1	1.37140E+00	5.27740E-03	4.95340E-03	0.00000E+00	6.35363E-14
2.87400E-01		2.64170E-02				
37	2	2.56760E-01	1.05370E-01	1.87510E-01	0.00000E+00	2.44562E-12
4.40750E-04		1.42480E+00				
38	1	1.37140E+00	5.27740E-03	4.95340E-03	0.00000E+00	6.35363E-14
2.87400E-01		2.64170E-02				
38	2	2.56760E-01	1.05370E-01	1.87510E-01	0.00000E+00	2.44562E-12
4.40750E-04		1.42480E+00				
39	1	1.45170E+00	7.98010E-05	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.60240E-01		1.95560E-03				
39	2	7.84280E-01	2.34680E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.46000E-04		4.28420E-01				
40	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01		4.67780E-02				
40	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05		2.41760E+00				
41	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01		4.67780E-02				
41	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05		2.41760E+00				
42	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01		4.67780E-02				
42	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05		2.41760E+00				
43	1	1.45170E+00	7.98010E-05	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.60240E-01		1.95560E-03				
43	2	7.84280E-01	2.34680E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.46000E-04		4.28420E-01				
44	1	1.37140E+00	5.27740E-03	4.95340E-03	0.00000E+00	6.35363E-14
2.87400E-01		2.64170E-02				
44	2	2.56760E-01	1.05370E-01	1.87510E-01	0.00000E+00	2.44562E-12
4.40750E-04		1.42480E+00				
45	1	1.37140E+00	5.27740E-03	4.95340E-03	0.00000E+00	6.35363E-14
2.87400E-01		2.64170E-02				
45	2	2.56760E-01	1.05370E-01	1.87510E-01	0.00000E+00	2.44562E-12
4.40750E-04		1.42480E+00				

46	1	1.37140E+00	5.27740E-03	4.95340E-03	0.00000E+00	6.35363E-14
2.87400E-01		2.64170E-02				
46	2	2.56760E-01	1.05370E-01	1.87510E-01	0.00000E+00	2.44562E-12
4.40750E-04		1.42480E+00				
47	1	1.37140E+00	5.27740E-03	4.95340E-03	0.00000E+00	6.35363E-14
2.87400E-01		2.64170E-02				
47	2	2.56760E-01	1.05370E-01	1.87510E-01	0.00000E+00	2.44562E-12
4.40750E-04		1.42480E+00				
48	1	1.37140E+00	5.27740E-03	4.95340E-03	0.00000E+00	6.35363E-14
2.87400E-01		2.64170E-02				
48	2	2.56760E-01	1.05370E-01	1.87510E-01	0.00000E+00	2.44562E-12
4.40750E-04		1.42480E+00				
49	1	1.45170E+00	7.98010E-05	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.60240E-01		1.95560E-03				
49	2	7.84280E-01	2.34680E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.46000E-04		4.28420E-01				
50	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01		4.67780E-02				
50	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05		2.41760E+00				
51	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01		4.67780E-02				
51	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05		2.41760E+00				
52	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01		4.67780E-02				
52	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05		2.41760E+00				
53	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01		4.67780E-02				
53	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05		2.41760E+00				
54	1	1.38820E+00	4.37420E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.80200E-01		3.18440E-02				
54	2	2.26390E-01	1.62610E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.07400E-05		1.65630E+00				
55	1	1.37140E+00	5.27740E-03	4.95340E-03	0.00000E+00	6.35363E-14
2.87400E-01		2.64170E-02				
55	2	2.56760E-01	1.05370E-01	1.87510E-01	0.00000E+00	2.44562E-12
4.40750E-04		1.42480E+00				
56	1	1.37140E+00	5.27740E-03	4.95340E-03	0.00000E+00	6.35363E-14
2.87400E-01		2.64170E-02				
56	2	2.56760E-01	1.05370E-01	1.87510E-01	0.00000E+00	2.44562E-12
4.40750E-04		1.42480E+00				
57	1	1.37140E+00	5.27740E-03	4.95340E-03	0.00000E+00	6.35363E-14
2.87400E-01		2.64170E-02				
57	2	2.56760E-01	1.05370E-01	1.87510E-01	0.00000E+00	2.44562E-12
4.40750E-04		1.42480E+00				
58	1	1.38820E+00	4.37420E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.80200E-01		3.18440E-02				
58	2	2.26390E-01	1.62610E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.07400E-05		1.65630E+00				
59	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01		4.67780E-02				
59	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05		2.41760E+00				
60	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01		4.67780E-02				
60	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05		2.41760E+00				
61	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01		4.67780E-02				
61	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05		2.41760E+00				
62	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01		4.67780E-02				
62	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05		2.41760E+00				
63	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01		4.67780E-02				

63	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05		2.41760E+00				
64	1	1.45170E+00	7.98010E-05	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.60240E-01		1.95560E-03				
64	2	7.84280E-01	2.34680E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.46000E-04		4.28420E-01				
65	1	1.37140E+00	5.27740E-03	4.95340E-03	0.00000E+00	6.35363E-14
2.87400E-01		2.64170E-02				
65	2	2.56760E-01	1.05370E-01	1.87510E-01	0.00000E+00	2.44562E-12
4.40750E-04		1.42480E+00				
66	1	1.37140E+00	5.27740E-03	4.95340E-03	0.00000E+00	6.35363E-14
2.87400E-01		2.64170E-02				
66	2	2.56760E-01	1.05370E-01	1.87510E-01	0.00000E+00	2.44562E-12
4.40750E-04		1.42480E+00				
67	1	1.37140E+00	5.27740E-03	4.95340E-03	0.00000E+00	6.35363E-14
2.87400E-01		2.64170E-02				
67	2	2.56760E-01	1.05370E-01	1.87510E-01	0.00000E+00	2.44562E-12
4.40750E-04		1.42480E+00				
68	1	1.45170E+00	7.98010E-05	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.60240E-01		1.95560E-03				
68	2	7.84280E-01	2.34680E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.46000E-04		4.28420E-01				
69	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01		4.67780E-02				
69	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05		2.41760E+00				
70	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01		4.67780E-02				
70	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05		2.41760E+00				
71	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01		4.67780E-02				
71	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05		2.41760E+00				
72	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01		4.67780E-02				
72	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05		2.41760E+00				
73	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01		4.67780E-02				
73	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05		2.41760E+00				
74	1	1.45170E+00	7.98010E-05	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.60240E-01		1.95560E-03				
74	2	7.84280E-01	2.34680E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.46000E-04		4.28420E-01				
75	1	1.38820E+00	4.37420E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.80200E-01		3.18440E-02				
75	2	2.26390E-01	1.62610E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.07400E-05		1.65630E+00				
76	1	1.45170E+00	7.98010E-05	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.60240E-01		1.95560E-03				
76	2	7.84280E-01	2.34680E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.46000E-04		4.28420E-01				
77	1	1.38820E+00	4.37420E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.80200E-01		3.18440E-02				
77	2	2.26390E-01	1.62610E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.07400E-05		1.65630E+00				
78	1	1.45170E+00	7.98010E-05	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.60240E-01		1.95560E-03				
78	2	7.84280E-01	2.34680E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.46000E-04		4.28420E-01				
79	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01		4.67780E-02				
79	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05		2.41760E+00				
80	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01		4.67780E-02				
80	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05		2.41760E+00				

[illegible]

98	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05	2.41760E+00					
99	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01	4.67780E-02					
99	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05	2.41760E+00					
100	1	1.22350E+00	4.87060E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3.51320E-01	4.67780E-02					
100	2	1.54020E-01	1.88030E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.99150E-05	2.41760E+00					
101	1	1.33400E+00	4.88620E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.98790E-01	3.50830E-02					
101	2	2.00870E-01	1.72020E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.88160E-05	1.85500E+00					
102	1	1.33400E+00	4.88620E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.98790E-01	3.50830E-02					
102	2	2.00870E-01	1.72020E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.88160E-05	1.85500E+00					
103	1	1.33400E+00	4.88620E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.98790E-01	3.50830E-02					
103	2	2.00870E-01	1.72020E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.88160E-05	1.85500E+00					
104	1	1.33400E+00	4.88620E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.98790E-01	3.50830E-02					
104	2	2.00870E-01	1.72020E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.88160E-05	1.85500E+00					
105	1	1.33400E+00	4.88620E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2.98790E-01	3.50830E-02					
105	2	2.00870E-01	1.72020E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7.88160E-05	1.85500E+00					
121	1	2.04160E+00	3.85490E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
1.72820E-01	3.42940E-03					
121	2	8.61270E-01	1.20840E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
1.34030E-04	4.20360E-01					
122	1	2.04160E+00	3.85490E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
1.72820E-01	3.42940E-03					
122	2	8.61270E-01	1.20840E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
1.34030E-04	4.20360E-01					
123	1	2.04160E+00	3.85490E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
1.72820E-01	3.42940E-03					
123	2	8.61270E-01	1.20840E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
1.34030E-04	4.20360E-01					
124	1	2.04160E+00	3.85490E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
1.72820E-01	3.42940E-03					
124	2	8.61270E-01	1.20840E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
1.34030E-04	4.20360E-01					
125	1	2.04160E+00	3.85490E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
1.72820E-01	3.42940E-03					
125	2	8.61270E-01	1.20840E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
1.34030E-04	4.20360E-01					
126	1	2.04160E+00	3.85490E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
1.72820E-01	3.42940E-03					
126	2	8.61270E-01	1.20840E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00

[illegible]

APÉNDICE F

MODELO MATEMÁTICO EN 3 DIMENSIONES DEL RP-10^c

```

Entrada para el CITATION-RP10GC (modelo TRIdimensional a 2 grupos)
Núcleo RP-10/RP-0. Potencia = 1MW
001
  0  0  0  0  0  1  1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  1  0  3  0  0  0
  0  1  0  0  0  0  0  0  1  1  0  1  1  1  0  0  0  0  0  0  0  0  0
999999 0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
      .000000E+00 .000000E+00 .000000E+00 .000000E+00 .000000E+00 .000000E+00
003
  0  0  0  0  11  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
      1E-04      1E-05      1E-04
0.000000E+00-2.000      0.100000E+010.100000E+010.100000E+010.000000E+00
4.570000E-024.180000E-01
004
  4      15.4  1      0.5  4      6.7  1      0.5  1      0.5  4      6.7
  1      0.5  1      0.5  4      6.7  1      0.5  1      0.5  4      6.7
  1      0.5  1      0.5  4      6.7  1      0.5  1      0.5  4      6.7
  1      0.5  1      0.5  4      6.7  1      0.5  1      0.5  4      6.7
  1      0.5  1      0.5  4      6.7  1      0.5  1      0.5  4      6.7
  1      0.5  4      15.4
  4      16.4  3      1.064  4      6.072  3      1.064  3      1.064  4      6.072
  3      1.064  3      1.064  4      6.072  3      1.064  3      1.064  4      6.072
  3      1.064  3      1.064  4      6.072  3      1.064  3      1.064  4      6.072
  3      1.064  3      1.064  4      6.072  3      1.064  3      1.064  4      6.072
  3      1.064  3      1.064  4      6.072  3      1.064  3      1.064  4      6.072
  3      1.064  4      16.4
  4      10.0 13      61.5  4      10.0
005

008
-1
999

```

^c Para este caso se ejecutó también a 3-D y los archivos (de extensa lectura) se pueden ver con el programa.